



TESIS

**PENGARUH *PULSE ON TIME* DAN *OPEN VOLTAGE*  
TERHADAP INTEGRITAS PERMUKAAN BENDA KERJA (IPBK)  
HASIL PEMOTONGAN BAJA PERKAKAS BUDERUS 2080 PADA  
PROSES *WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (WEDM)**

RIFKY MAULANA YUSRON  
NRP 2112201001

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA  
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2014



TESIS - TM142501

# **EFFECTS OF PULSE ON TIME AND OPEN VOLTAGE IN BUDERUS 2080 TOOL STEEL WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (WEDM) PROCESS ON SURFACE INTEGRITY**

RIFKY MAULANA YUSRON  
NRP 2112201001

Advisor

Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA  
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D

MASTER PROGRAM  
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM  
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2015



**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:**

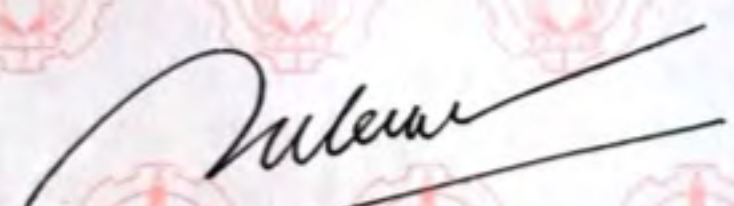
**RIFKY MAULANA YUSRON**

**NRP. 2112 201 001**

**Tanggal Ujian : 23 Januari 2015**

**Periode Wisuda : Maret 2015**

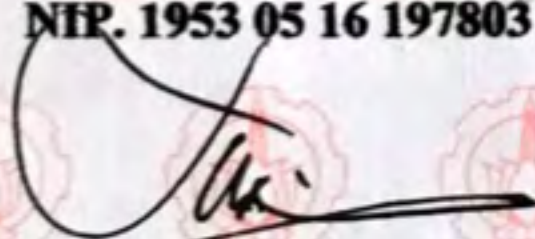
**Disetujui oleh:**

  
**1. Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA.  
NIP. 1963 08 15 198903 2 001**


**(Pembimbing 1)**

  
**2. Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 1953 05 16 197803 1 001**

**(Pembimbing 2)**



  
**3. Dr. Ir. Soeharto, DEA.  
NIP. 1948 09 11 198103 1 001**

**(Penguji)**

  
**4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  
NIP. 1960 06 23 198803 1 002**

**(Penguji)**

**Direktur Program Pascasarjana,**

  
  
**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
NIP. 1964 04 05 199002 1 001**



# **PENGARUH *PULSE ON TIME* DAN *OPEN VOLTAGE* TERHADAP INTEGRITAS PERMUKAAN BENDA KERJA (IPBK) HASIL PEMOTONGAN BAJA PERKAKAS BUDERUS 2080 PADA PROSES *WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING* (WEDM)**

Nama Mahasiswa : Rifky Maulana Yusron  
NRP : 2112201001  
Pebimbing I : Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA  
Pembimbing II : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D

## **ABSTRAK**

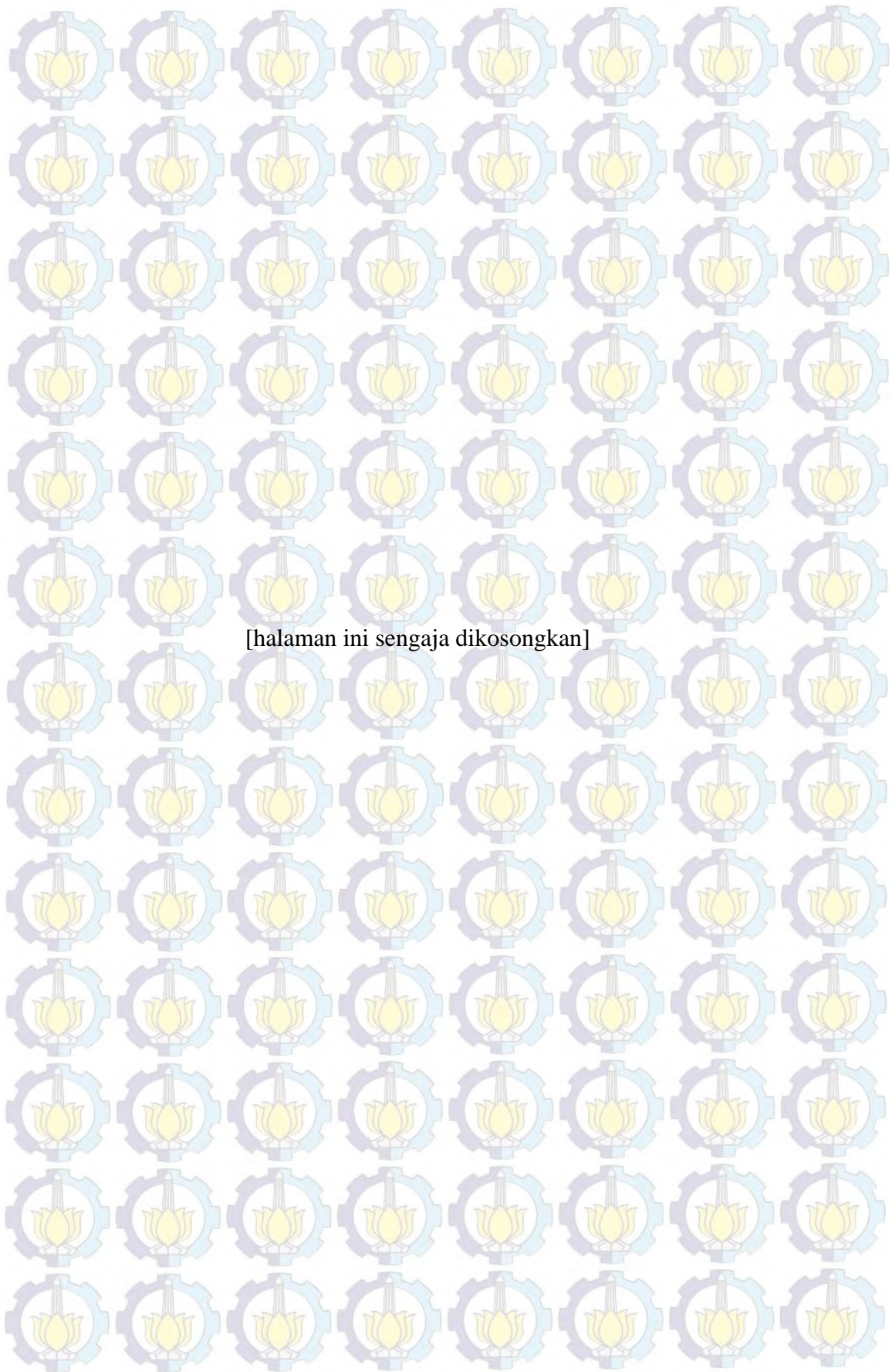
Salah satu dari ukuran kinerja proses WEDM adalah integritas permukaan benda kerja (IPBK). Beberapa unsur IPBK yang biasa diamati pada hasil proses pemotongan dengan WEDM adalah lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan kekerasan mikro. Pada proses WEDM pelepasan material benda kerja terjadi karena adanya pelelehan dan penguapan dari material benda kerja. Pembilasan oleh cairan dielektrik menyebabkan terjadinya pendinginan secara cepat, sehingga terjadi pembekuan ulang dari material yang meleleh pada permukaan yang mengalami proses pemesinan. Lapisan yang terbentuk sebagai hasil pembekuan ulang pada permukaan benda kerja disebut sebagai lapisan *recast*. Pendinginan secara cepat tersebut juga menyebabkan terjadinya kawah-kawah yang relatif dalam dan kekerasan yang tidak homogen pada permukaan benda kerja yang telah mengalami proses WEDM. Kawah-kawah tersebut meningkatkan nilai kekasaran permukaan pada benda kerja. Kekerasan mikro terjadi karena adanya tegangan sisa dan perubahan-perubahan yang berhubungan dengan aspek metalurgi. Kekerasan mikro penting dalam menggambarkan penyimpangan karakteristik permukaan benda kerja.

Suatu penelitian dilakukan untuk mengamati pengaruh dari *pulse on time* dan *open voltage* terhadap lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan kekerasan mikro pada permukaan benda kerja yang telah mengalami proses WEDM. Variabel proses *pulse on time* memiliki tiga level (2  $\mu$ s, 4  $\mu$ s dan 6  $\mu$ s). Variabel *open voltage* memiliki tiga level (75 V, 90 V dan 105 V) Rancangan eksperimen yang digunakan pada penelitian ini adalah faktorial 3 X 3. Kekasaran permukaan diukur menggunakan *surftest*, lapisan *recast* diamati menggunakan SEM dan diukur menggunakan perangkat lunak AutoCAD, serta kekerasan mikro diukur menggunakan Vickers *microhardness tester*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel *pulse on time* dan *open voltage* berbanding lurus terhadap respon kekasaran permukaan dan ketebalan lapisan *recast*, serta berbanding terbalik terhadap kekerasan mikro. Kekasaran permukaan tertinggi yang didapat pada penelitian ini adalah sebesar 2,52  $\mu$ m. Lapisan *recast* paling tebal yang didapat adalah sebesar 6,16  $\mu$ m. Kekerasan mikro terendah adalah sebesar 609,03 VHN.

Kata kunci : kekasaran permukaan, lapisan *recast*, kekerasan mikro, WEDM.







# **INFLUENCE PULSE ON TIME DAN OPEN VOLTAGE TO SURFACE INTEGRITY ON BUDERUS 2080 TOOL STEEL USING WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (WEDM) PROCESS**

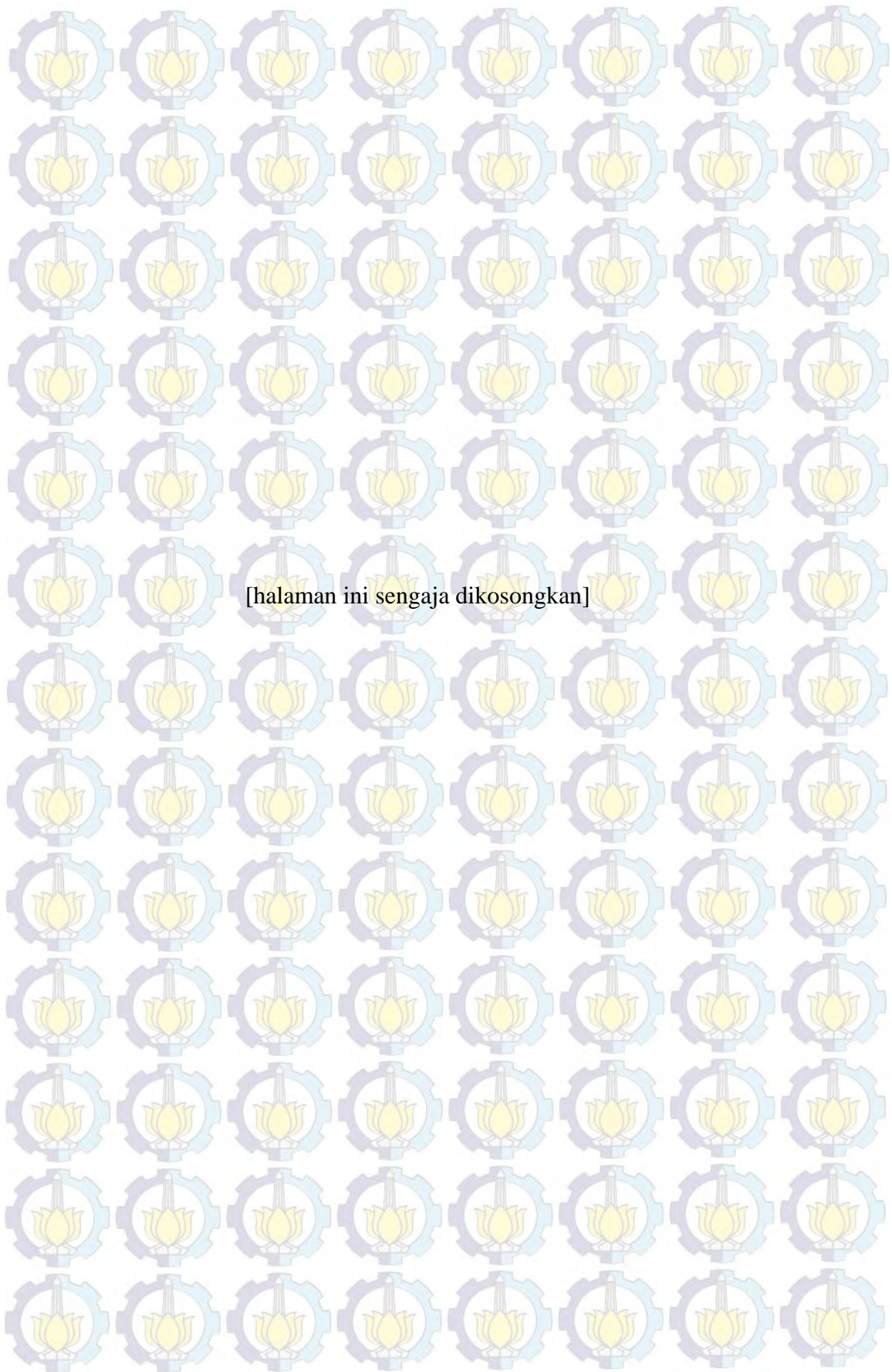
Student Name : Rifky Maulana Yusron  
NRP : 2112201001  
Advisor I : Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA  
Advisor II : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D

## **ABSTRACT**

In the WEDM process material removal on work piece is due to the melting and evaporation of work piece material. Flushing by dielectric fluid causing rapid cooling at the surface undergoes machining process. This influence quality results of the final product WEDM. During machining process the work piece material melt and resolidify, that is known as recast layer. The rapid cooling also causes craters that are relatively deep and hardness that is non-uniform in the surface of the WEDMed work piece. That craters affect the surface roughness of the work piece. Micro hardness is due to the residual stress and change associated with metallurgical aspects. In the WEDM process, surface roughness and micro hardness are important in describing the distortion characteristics of the work piece surface. An experiment was conducted to investigate the effect of pulse on time and open voltage to recast layer, surface roughness and micro hardness on the surface of the work piece which has undergone a process of WEDM. There are 3 levels of pulse on time (2  $\mu$ s, 4  $\mu$ s and 6  $\mu$ s), and 3 levels of open voltage (75 V, 90 V and 105 V). A design factorial 3 x 3 was used in this research. The surface roughness was measured using surftest, recast layer was observed using SEM and measured using AutoCAD software and micro hardness was measured using a Vickers micro hardness tester. The results show that the WEDMed surface topography dominated by creators, pockmarks, globules and debris at high pulse on time and open voltage. The recast layers is thick and non-uniform on high pulse on time and open voltage. Compared to the parent material, recast layers have lower microhardness due to significant thermal degradation, caused by high pulse on time and open voltage.

key words : surface roughness, recast layer, microhardness, WEDM.







## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT., karena atas Rahmat dan Kuasa-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan, dukungan dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis selama penyusunan tesis ini. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA dan Bapak Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing.
2. Bapak Dr.Ir. Suharto, DEA. dan Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen penguji tesis.
3. Ayah, Ibu, dan Adik tersayang, Sarimun, Musyrifah Madani dan Fitri, serta Nafiys yang telah banyak memberikan dukungan, semangat dan serta doa restunya.
4. Rica Wijayanti, yang selalu memberi semangat.
5. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS atas bantuan dan dukungannya.
6. Teman-teman mahasiswa S2 Sistem dan Rekayasa Manufaktur angkatan 2012.
7. Segenap keluarga besar Teknik Mesin ITS yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis mengharapkan agar tesis ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca dan penelitian selanjutnya. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan sehingga tesis ini bisa lebih sempurna.

Surabaya, 23 Januari 2015

Penulis





**Jika anda menginginkan suatu hal yang belum pernah anda miliki, maka anda harus bersedia melakukan suatu hal belum pernah anda lakukan.**  
**(Thomas Jefferson)**



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	 <b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6
1.2.1 Batasan Masalah .....	6
1.2.2 Asumsi Penelitian .....	6
1.3 Tujuan Penelitian .....	7
1.4 Manfaat Penelitian .....	7
 <b>BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>	 <b>9</b>
2.1 Proses Pemesinan EDM .....	9
2.2 Prinsip Dasar WEDM .....	10
2.2.1 Mekanisme Pengerjaan Bahan .....	12
2.3 Faktor-faktor Pada Proses Pemesinan WEDM .....	14
2.4 Integritas permukaan benda kerja .....	17
2.4.1 Kekasaran Permukaan .....	17
2.4.2 Lapisan <i>Recast</i> .....	22
2.4.3 Kekerasan Mikro .....	23
2.4.3.1 Uji Kekerasan Vickers .....	24
2.5 Kawat Elektroda .....	26
2.5.1 Kuningan .....	26
2.5.2 Tembaga .....	26
2.5.3 Kawat yang Dilapisi .....	26
2.6 Desain Eksperimen .....	27
2.6.1 Tahap Perencanaan .....	27

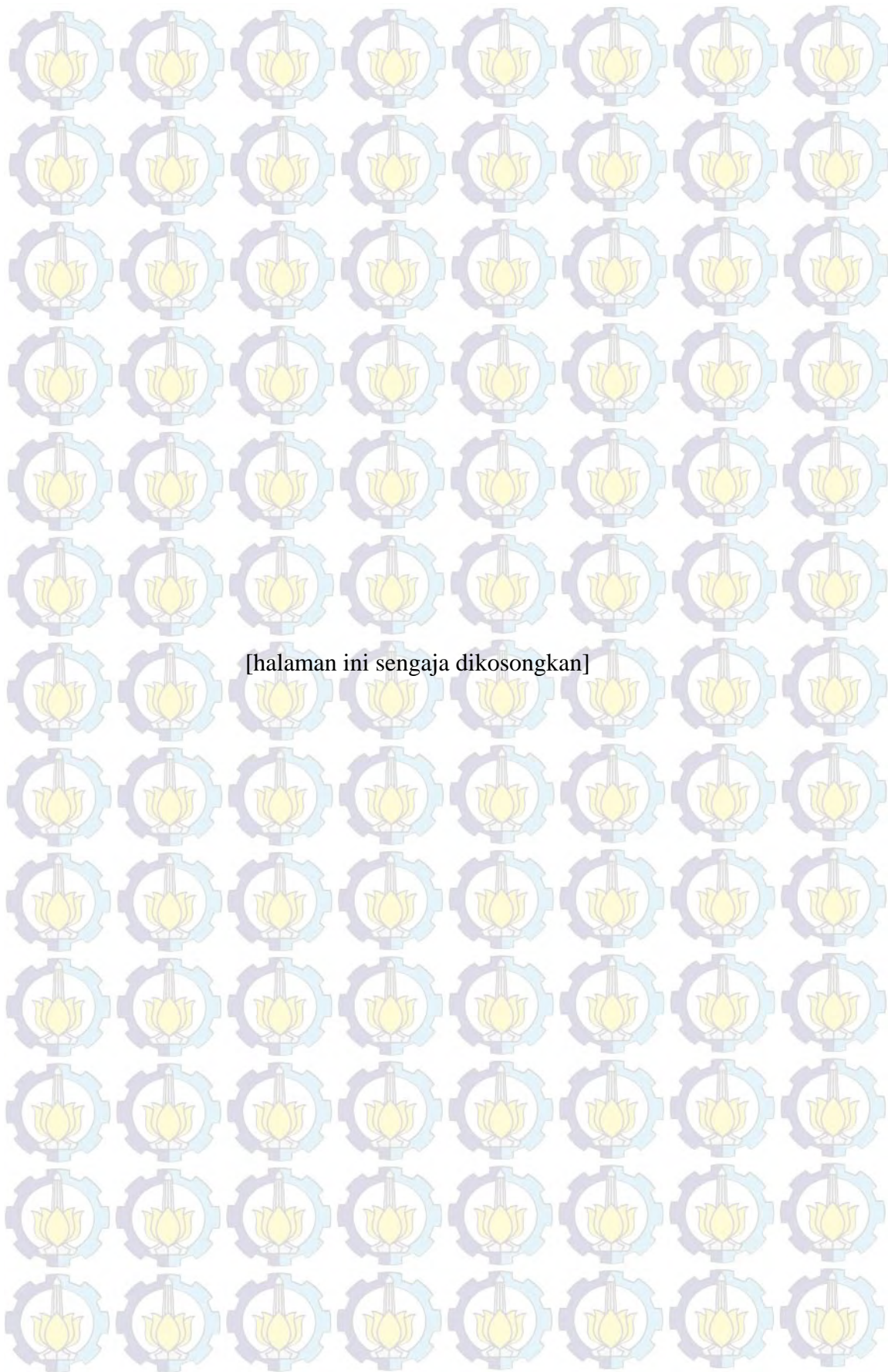


2.6.2 Tahap Pelaksanaan .....	28
2.6.3 Tahap Analisis .....	29
2.7 Metode Faktorial .....	33
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>35</b>
3.1 Tahapan Penelitian .....	35
3.2 Faktor-Faktor Dalam Penelitian .....	37
3.3 Faktor <i>Noise</i> .....	38
3.4 Bahan dan Peralatan .....	38
3.4.1 Bahan Penelitian .....	38
3.4.2 Peralatan Penelitian .....	40
3.5 Prosedur penelitian .....	42
3.6 Pengukuran dan pengambilan data .....	43
3.6.1 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan .....	43
3.6.2 Pengambilan Data Ketebalan <i>Lapisan Recast</i> .....	44
3.6.3 Pengambilan Data Kekerasan Mikro .....	45
3.7 Rancangan percobaan .....	45
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>47</b>
4.1 Pengaruh Variabel ON dan OV Terhadap Kekasaran Permukaan .....	47
4.1.1 Uji Identik .....	50
4.1.2 Uji Independen .....	50
4.1.3 Uji Kenormalan .....	52
4.2 Pengaruh Variabel ON dan OV terhadap Lapisan <i>Recast</i> .....	60
4.2.1 Uji Identik .....	64
4.2.2 Uji Independen .....	64
4.2.3 Uji Kenormalan .....	65
4.3 Pengaruh Variabel ON dan OV terhadap Kekerasan Mikro .....	72
4.3.1 Uji Identik .....	75
4.3.2 Uji Independen .....	76
4.3.3 Uji Kenormalan .....	77







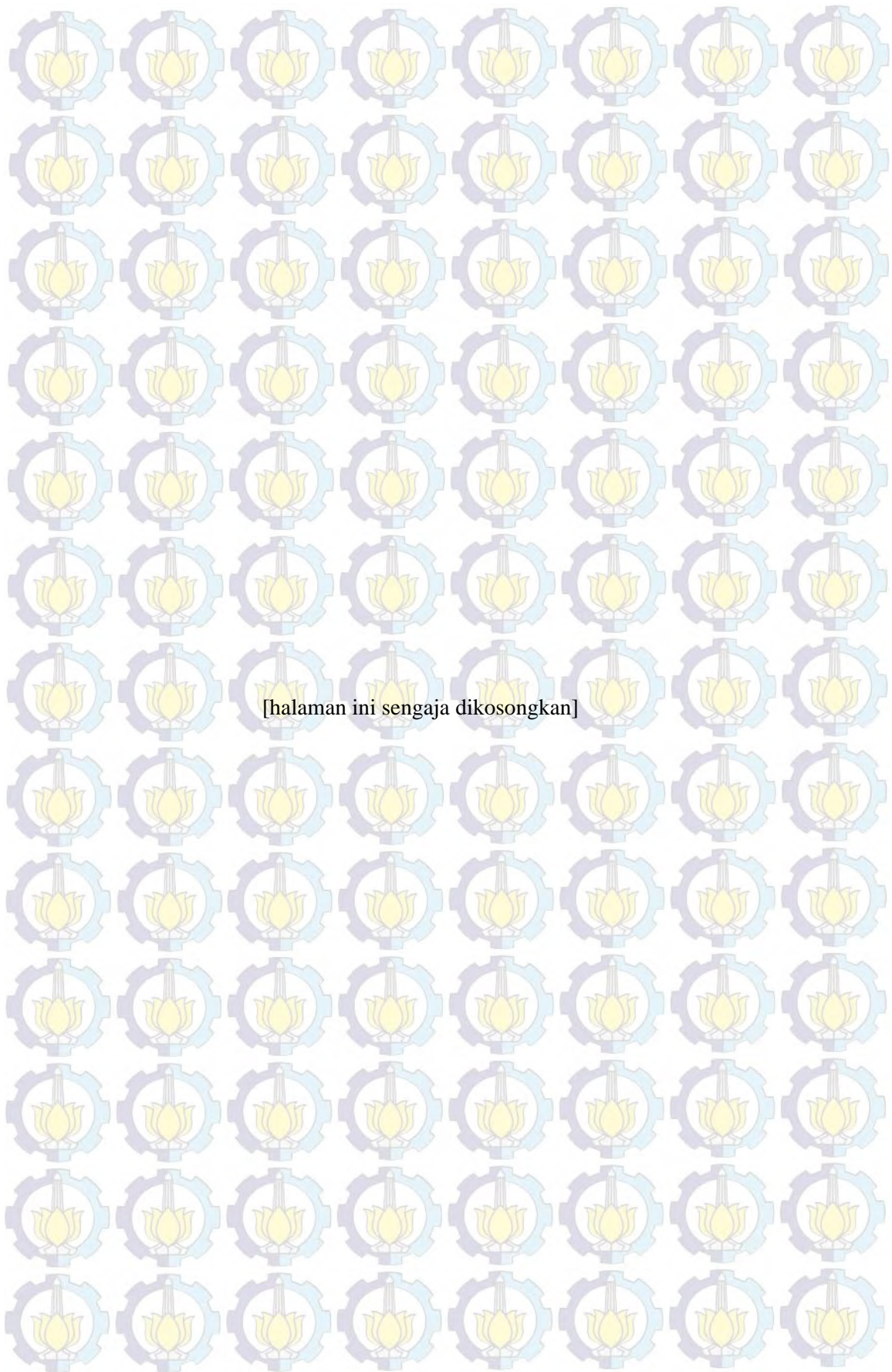




## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Angka Kekasaran dan Panjang Sampel Standar .....	20
Tabel 2.2	Nilai Kekasaran yang Dicapai Oleh Beberapa Pengerjaan .....	21
Tabel 2.3	Tabel Analisis Variansi (ANAVA) Dua Arah .....	30
Tabel 2.4	Susunan Data Untuk Sebuah Rancangan Faktorial Tiga Faktor	33
Tabel 3.1	Komposisi kimia baja perkakas buderus 2080 .....	38
Tabel 3.2	Isian Rancangan Percobaan .....	45
Tabel 4.1	Data Kekasaran Permukaan Hasil Eksperimen .....	47
Tabel 4.2	Analisis Variansi (ANAVA) Variabel Proses Pada Kekasaran Permukaan .....	48
Tabel 4.3	Kondisi Hipotesis Nol Pada Respon Kekasaran Permukaan .....	50
Tabel 4.4	Hasil Uji Tukey pada ON Untuk Respon Kekasaran Permukaan	50
Tabel 4.5	Hasil Uji Tukey pada OV untuk respon kekasaran permukaan .	48
Tabel 4.6	Topografi Permukaan Benda Kerja Hasil Pengamatan .....	55
Tabel 4.7	Data Lapisan <i>Recast</i> Hasil Eksperimen .....	61
Tabel 4.8	Analisis Variansi (ANAVA) Variabel Proses Pada Lapisan <i>Recast</i> .....	61
Tabel 4.9	Kondisi hipotesis nol multirespon pada respon lapisan <i>recast</i> .	62
Tabel 4.10	Hasil Uji Tukey pada ON Terhadap Respon Lapisan <i>Recast</i> ....	63
Tabel 4.11	Hasil Uji Tukey pada OV Terhadap Respon Lapisan <i>Recast</i> .....	63
Tabel 4.12	Bentuk Lapisan <i>Recast</i> Yang Didapat Selama Penelitian .....	68
Tabel 4.13	Data Hasil Eksperimen Kekerasan Mikro.....	73
Tabel 4.14	Analisis Variansi (ANAVA) Variabel Proses Pada Kekerasan Mikro .....	74
Tabel 4.15	Kondisi Hipotesis Nol Pada Respon Kekerasan Mikro .....	75
Tabel 4.16	Hasil Uji Tukey Pada ON Terhadap Respon Kekerasan Mikro	75
Tabel 4.17	Hasil Uji Tukey Pada OV Terhadap Respon Kekerasan Mikro .	76







## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi proses pemesinan EDM.....	10
Gambar 2.2.	Ilustrasi pemotongan pada WEDM .....	11
Gambar 2.3	Pembangkitan tegangan dan arus listrik oleh catu daya .....	12
Gambar 2.4	Pengikisan material oleh bunga api listrik saat ON.....	13
Gambar 2.5	Proses pengikisan material yang berhenti saat OFF .....	13
Gambar 2.6	Pembilasan geram oleh cairan dielektrik .....	14
Gambar 2.7	Skema terjadinya ON dan OFF .....	14
Gambar 2.8	Hubungan antara <i>wire drag</i> dan ketegangan kawat .....	16
Gambar 2.9	Parameter dalam profil permukaan .....	17
Gambar 2.10	Lapisan material yang terjadi pada proses WEDM .....	22
Gambar 2.11	Hubungan antara ketebalan lapisan dan durasi pulse pada EDM .....	23
Gambar 2.12	Kekerasan tiap lapisan pada benda kerja hasil WEDM .....	24
Gambar 2.13	Ilustrasi penumbuk Vickers .....	25
Gambar 3.1	Diagram alir metodologi penelitian .....	35
Gambar 3.2	Skema proses pemotongan benda kerja .....	39
Gambar 3.3	Dimensi dan arah pemotongan benda kerja .....	39
Gambar 3.4	Mesin WEDM CHMER 32GF .....	40
Gambar 3.5	<i>Scanning electron microscope</i> (SEM) Inspect S50 .....	41
Gambar 3.6	Vicker's <i>microhardness tester</i> tipe Wilson Hardness 402MDV .....	41
Gambar 3.7	Mitutoyo Surf test 301 .....	42
Gambar 3.8	Skema arah proses pemotongan dan arah pengukuran KP benda kerja .....	44
Gambar 3.9	Skema proses pengukuran tebal LR .....	44
Gambar 3.10	Prosedur pengambilan data KM .....	45
Gambar 4.1	Plot ACF pada respon kekasaran permukaan .....	51
Gambar 4.2	Plot residual kekasaran permukaan <i>versus fitted values</i> .....	51
Gambar 4.3	Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan .....	52
Gambar 4.4	Grafik pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon KP ....	53



Gambar 4.5	Grafik surface plot pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon nilai KP .....	53
Gambar 4.6	Topografi permukaan benda kerja pada kombinasi ON rendah dan OV tinggi (ON = 2 $\mu$ s dan OV = 105 V) .....	58
Gambar 4.7	Topografi permukaan benda kerja pada kombinasi ON rendah dan OV tinggi (ON = 6 $\mu$ s dan OV = 75 V) .....	59
Gambar 4.8	Plot ACF pada respon lapisan recast .....	64
Gambar 4.9	Plot residual respon lapisan <i>recast versus fitted values</i> .....	65
Gambar 4.10	Plot uji distribusi normal pada respon lapisan <i>recast</i> .....	66
Gambar 4.11	Grafik pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon ketebalan lapisan <i>recast</i> .....	66
Gambar 4.12	Grafik pengaruh aktor ON dan OV terhadap respon ketebalan lapisan <i>recast</i> .....	67
Gambar 4.13	Bentuk jejak <i>identor</i> pada benda kerja .....	73
Gambar 4.14	Plot ACF pada respon kekerasan mikro .....	76
Gambar 4.15	Plot residual respon kekerasan mikro <i>versus fitted values</i> ....	77
Gambar 4.16	Plot uji distribusi normal pada respon kekerasan mikro .....	78
Gambar 4.17	Grafik pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon kekerasan mikro .....	78
Gambar 4.18	Grafik surface plot pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon KM .....	79





## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses pemesinan konvensional, walaupun dilengkapi dengan teknologi yang canggih, sejauh ini masih kurang memadai untuk proses pemesinan menggunakan material dengan kekerasan yang tinggi dan kontur yang kompleks, yang tidak dapat diselesaikan dengan proses pemesinan konvensional. Untuk mengatasi masalah tersebut, maka pada saat ini di dunia industri pemesinan banyak digunakan proses pemesinan non konvensional.

Salah satu dari proses pemesinan non konvensional adalah proses pemotongan dengan menggunakan teknologi pemotongan *wire electrical discharge machining* (WEDM) yang merupakan pengembangan dari *electrical discharge machining* (EDM). WEDM pertama kali diperkenalkan ke industri manufaktur pada akhir tahun 1960. Pengembangannya merupakan hasil dari pencarian sebuah cara untuk menggantikan proses pemesinan menggunakan EDM, karena tuntutan pengerjaan komponen dengan tingkat kepresisian yang tinggi. Pada tahun 1974 D.H. Dulebohn menggunakan sistem *optical-line follower* untuk mengendalikan bentuk dari komponen yang akan mengalami proses pemesinan menggunakan WEDM secara otomatis. Sejak tahun 1975 kepopuleran mesin WEDM meningkat secara cepat, hal ini selain dikarenakan WEDM dapat memproses benda kerja dengan tingkat keakurasian yang tinggi, juga lebih mudah dipahami oleh industri manufaktur. Menjelang akhir dekade 1970an, ketika sistem *computer numerical control* (CNC) diaplikasikan pada WEDM, terjadi evolusi besar pada proses pemesinan WEDM (Ho dkk., 2004).

Penggunaan WEDM yang sangat luas mencakupi industri *aerospace*, nuklir, otomotif, perkakas, perhiasan, *mould* dan *dies*. Bahkan baru-baru ini mulai digunakan dalam industri pembuatan peralatan medis. Hal ini dikarenakan WEDM mampu memproses material keras seperti titanium, nimonik dan zirkonium secara efektif. Namun proses pemesinan WEDM tetap memiliki permasalahan tersendiri, diantaranya karena adanya pembentukan *heat affective*





zone (HAZ), lapisan *recast* (LR), retak mikro (RM), porositas, pengerasan atau pelunakan lokal, pertumbuhan butir kristal (*grain growth*) dan terbentuknya paduan secara tidak sengaja karena perpindahan unsur kimia dari kawat atau cairan dielektrik (Aspinwall dkk., 2008).

Baja perkakas Buderus 2080 adalah baja perkakas yang memiliki ketahanan yang tinggi terhadap keausan dan memiliki kestabilan tingkat keuletan yang baik dalam pengerasan. Kekerasan baja perkakas Buderus 2080 berkisar antara 59 HRC hingga 63 HRC setelah mengalami proses perlakuan panas. Baja perkakas Buderus 2080 sering kali digunakan sebagai *punch* dan *dies* karena sifatnya yang keras dan tahan terhadap panas. Dalam hal ini *punch* dan *dies* digunakan untuk membentuk sebuah produk, sehingga *punch* dan *dies* tersebut dituntut untuk memiliki permukaan yang halus dan kepresisian yang tinggi.

Berdasarkan pada teori WEDM, kekasaran permukaan (KP) secara signifikan dipengaruhi oleh *pulse on time* (ON), *peak current* dan kecepatan pemotongan. Ketika ON meningkat, KP juga meningkat. Hal ini dikarenakan terjadinya "*double sparkling*", *double sparkling* terjadi ketika nilai ON tinggi, sehingga menghasilkan frekuensi percikan bunga api listrik yang lebih sering. Percikan bunga api listrik tersebut menumbuk benda kerja, kemudian diikuti dengan percikan bunga api listrik selanjutnya. *Double sparkling* mengakibatkan permukaan pada benda kerja (BK) menjadi lebih kasar. Selain ON faktor lain yang cukup berpengaruh terhadap KP adalah *peak current*, sedangkan *pulse off time* (OFF), tekanan pembilasan dan kecepatan kawat merupakan faktor yang kurang signifikan pengaruhnya terhadap KP (Ghodsieh dkk., 2013).

Suatu penelitian telah dilakukan dengan mengamati pengaruh parameter proses WEDM terhadap LR yang meliputi formasi dan karakteristiknya (Newton dkk., 2009). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Inconel 718. Elektroda yang digunakan adalah *hard brass wire* dengan diameter sebesar 0,01mm dan 0,25mm. Faktor yang diamati dalam penelitian ini adalah diameter kawat, *table feed rate*, OFF dan *spark energy*. Faktor *spark energy* melalui pengaturan peningkatan OV, *peak current*, *pulse current* dan ON. Rancangan eksperimen yang digunakan adalah faktorial fraksi yang memiliki 24 kombinasi faktor. Faktor diameter kawat, *table feed rate* dan *cycle spark* memiliki 2 level,





dan untuk kawat dengan diameter 0,10 mm faktor *spark energy* yang digunakan adalah sebesar 4 mJ, 6 mJ dan 8 mJ. Kawat dengan diameter 0,25 mm menggunakan *spark energy* sebesar 6 mJ, 12 mJ dan 18 mJ. Hal ini dilakukan karena kawat dengan diameter 0,10 mm akan putus (*rupture*) ketika menerima *spark energy* lebih dari 8 mJ. *Analysis of variance* (ANOVA) digunakan untuk mengamati adanya variansi *spark energy* pada faktor kawat yang berbeda diameter. Pada penelitian ini dilakukan pemetaan unsur (*elemental mapping*) dengan menggunakan *electron probe micro analyzer* (EPMA). Hasil pengamatan dengan menggunakan EPMA menunjukkan terjadinya penurunan intensitas unsur kromium dari material induk sebesar 15 % karena terdifusi ke LR. Pada LR ditunjukkan adanya peningkatan kandungan unsur tembaga dan seng, sementara pada material induk hanya terdapat unsur tembaga sebesar 0,06 % dan tidak ada unsur seng. Hal ini menunjukkan terjadinya perpindahan unsur tembaga dan seng dari kawat elektroda selama proses pemesian. Kandungan nikel pada material induk tidak mengalami perubahan. Hal ini karena nikel memiliki ketahanan terhadap elektrolisis dan aus yang tinggi. Pelunakan terjadi pada LR, hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan komposisi pada LR dan elektrolisis dari cairan dielektrik dan kawat elektroda yang terjadi selama proses pemesian. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada semua kondisi pemesian, ketebalan LR berkisar antara 5,10  $\mu\text{m}$  sampai 8,51  $\mu\text{m}$ . Ketebalan LR berbanding lurus dengan OV. Pemotongan dengan kawat dengan diameter 0,25 mm memiliki KP yang lebih besar, jika dibandingkan dengan kawat dengan diameter 0,10 mm.

Suatu penelitian lain mengenai pengaruh panjang pemotongan dan jenis kawat elektroda terhadap integritas permukaan benda kerja (IPBK) telah dilakukan pada proses pemesian WEDM (Aspinwall dkk., 2008). Dalam penelitian ini faktor yang digunakan adalah panjang pemotongan, jenis material dan jenis kawat elektroda. Benda kerja yang digunakan adalah titanium *alloy* (Ti-64I-4V) dan Inconel 718. Kawat yang digunakan adalah kawat jenis kuningan dengan pelapisan seng (*zinc coated brass wire*) dan kawat kuningan tanpa pelapisan (*uncoated brass wire*). Dalam penelitian ini pemotongan *roughing* digunakan sebagai pemotongan referensi. Hasil dari pemotongan referensi tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai KP dan ketebalan LR hasil dari





proses *trim cutting*. Proses WEDM *trim cutting* dilakukan dengan kedalaman potong sebesar 74  $\mu\text{m}$ , 18  $\mu\text{m}$ , 11  $\mu\text{m}$  dan 2  $\mu\text{m}$  menggunakan *zinc coated brass wire*. Selain itu proses pemotongan dengan WEDM *trim cutting* juga dilakukan dengan kedalaman potong sebesar 40  $\mu\text{m}$ , 12  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$  dan 2  $\mu\text{m}$  menggunakan *uncoated brass wire*. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pada kondisi kedalaman pemotongan terendah, *zinc coated brass wire* menghasilkan KP sebesar 0,21  $\mu\text{m}$ . Selain itu tidak ditemukan LR, baik untuk material titanium *alloy* maupun Inconel 718. Proses pemesinan WEDM dengan menggunakan kedalaman potong yang sama dari *uncoated brass wire* menghasilkan KP sebesar 0,40  $\mu\text{m}$  untuk material titanium *alloy* dan sebesar 0,31  $\mu\text{m}$  untuk material Inconel 718. LR tidak terjadi pada proses pemotongan dengan WEDM untuk kedua jenis material tersebut.

Penelitian lain yang mengamati proses pemesinan WEDM dengan respon IPBK dilakukan dengan menggunakan faktor *pulse current* (PC) dan ON (Hassan dkk., 2009). Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *orthogonal array*  $L_9$ , di mana masing-masing faktor memiliki tiga level. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja AISI 4140 dan kawat elektroda yang digunakan adalah kawat kuningan jenis *hard brass wire*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan ON dan PC akan meningkatkan KP pada BK maupun kedalaman dari RM dan *microvoids*. KP yang dihasilkan antara 0,1181  $\mu\text{m}$  sampai 0,1453  $\mu\text{m}$ . Semakin rendah PC maka penetrasi percikan bunga api listrik yang diterima permukaan BK semakin berkurang sehingga menghasilkan permukaan BK yang halus. Semakin rendah ON mengakibatkan energi panas yang ditransfer kepermukaan BK berkurang, sehingga semakin sedikit material yang meleleh. Penyebab utama RM karena adanya tegangan termal pada permukaan BK yang mengalami proses pemesinan, hal ini disebabkan oleh pemanasan dan pendinginan yang cepat serta distribusi temperatur yang tidak seragam pada BK.

Suatu penelitian lain dilakukan dengan mengamati pengaruh parameter proses pemesinan WEDM (Rupajati, 2013). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja perkakas SKD61. Elektroda kawat yang digunakan adalah kawat kuningan ukuran diameter 0,25 mm. Dalam penelitian ini faktor yang diamati adalah ON, OFF, *open voltage* (OV), *arc on time* (AN) dan *servo voltage* (SV).





Rancangan percobaan ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi *orthogonal array* L<sub>18</sub>. Faktor AN memiliki dua level, sedangkan faktor lainnya memiliki 3 level. Respon yang diamati adalah LR, KP dan RM. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa persen kontribusi untuk variansi total dari faktor-faktor yang signifikan untuk meminimalkan LR dan KP secara serentak adalah ON sebesar 43,27 %, OV sebesar 19,45 %, SV sebesar 15,64 %, AN sebesar 11,66 % dan OFF sebesar 3,68 %. Faktor ON dan OV berbanding lurus terhadap respon LR dan KP. Selama proses pemotongan WEDM terdapat 2 fase, yaitu fase ON dan OFF. Pada fase ON terjadi proses pemotongan dan pada fase OFF tidak terjadi proses pemotongan. Ketika memasuki fase ON, loncatan bunga api berlangsung. Semakin lama terjadinya loncatan bunga api, panas yang terkonduksi pada BK akan menjadi lebih dalam. Panas tersebut akan menyebabkan LR yang terbentuk menjadi semakin tebal. Semakin tinggi nilai ON, energi yang digunakan juga akan semakin besar. Energi yang besar ini akan mengikis BK, sehingga akan membuat kawah terbentuk pada permukaan BK menjadi semakin dalam. Hal tersebut akan menyebabkan KP semakin tinggi. Semakin tinggi nilai OV akan menyebabkan beda potensial yang terjadi antara BK dan kawat elektroda juga tinggi, sehingga energi yang digunakan untuk mengikis BK akan semakin besar. Energi yang besar ini membuat panas yang terkonduksi pada BK menjadi lebih dalam, sehingga LR yang dihasilkan menjadi lebih tebal. Panas tersebut juga menyebabkan BK yang terkikis menjadi semakin banyak dan kawah yang terbentuk pada permukaan BK juga akan semakin dalam. Hal ini tentu akan menyebabkan KP menjadi lebih tinggi. RM yang lebar dan panjang terjadi karena adanya peningkatan nilai ON, SV, AN dan OV yang diiringi dengan penurunan nilai OFF. Selain itu, RM juga dipengaruhi oleh adanya tegangan internal pada BK.

Berdasarkan hal-hal yang telah dijelaskan, penelitian tentang penentuan pengaturan faktor-faktor pemesinan pada proses WEDM perlu dilakukan untuk mengamati fenomena IPBK yang meliputi kekasaran permukaan, lapisan *recast*, dan kekerasan mikro. Desain eksperimen yang digunakan pada penelitian ini adalah desain eksperimen faktorial.





## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dari ON dan OV terhadap IPBK pada pemotongan baja perkakas Buderus 2080 dengan menggunakan WEDM.

### 1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah, serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas sistem elektronika, sistem kontrol, dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.
2. Tidak membahas komponen biaya pada proses pemesinan.
3. Tidak membahas proses perlakuan panas pada benda kerja.
4. Tidak membahas perubahan struktur mikro LR yang timbul pada permukaan benda kerja.
5. Material yang digunakan adalah baja perkakas Buderus 2080.
6. Cairan dielektrik yang digunakan adalah *Aqua destilata*.
7. Jenis kawat elektroda yang digunakan adalah kawat kuningan yang dilapisi seng.
8. Material telah mengalami proses *heat treatment* sebelum dilakukan proses pemesinan.

### 1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi-asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Variabel-variabel proses yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Material yang digunakan memiliki kehomogenan sifat mekanik dan komposisi kimia.
3. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi baik.
4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.





5. Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara variabel-variabel proses yang diteliti.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

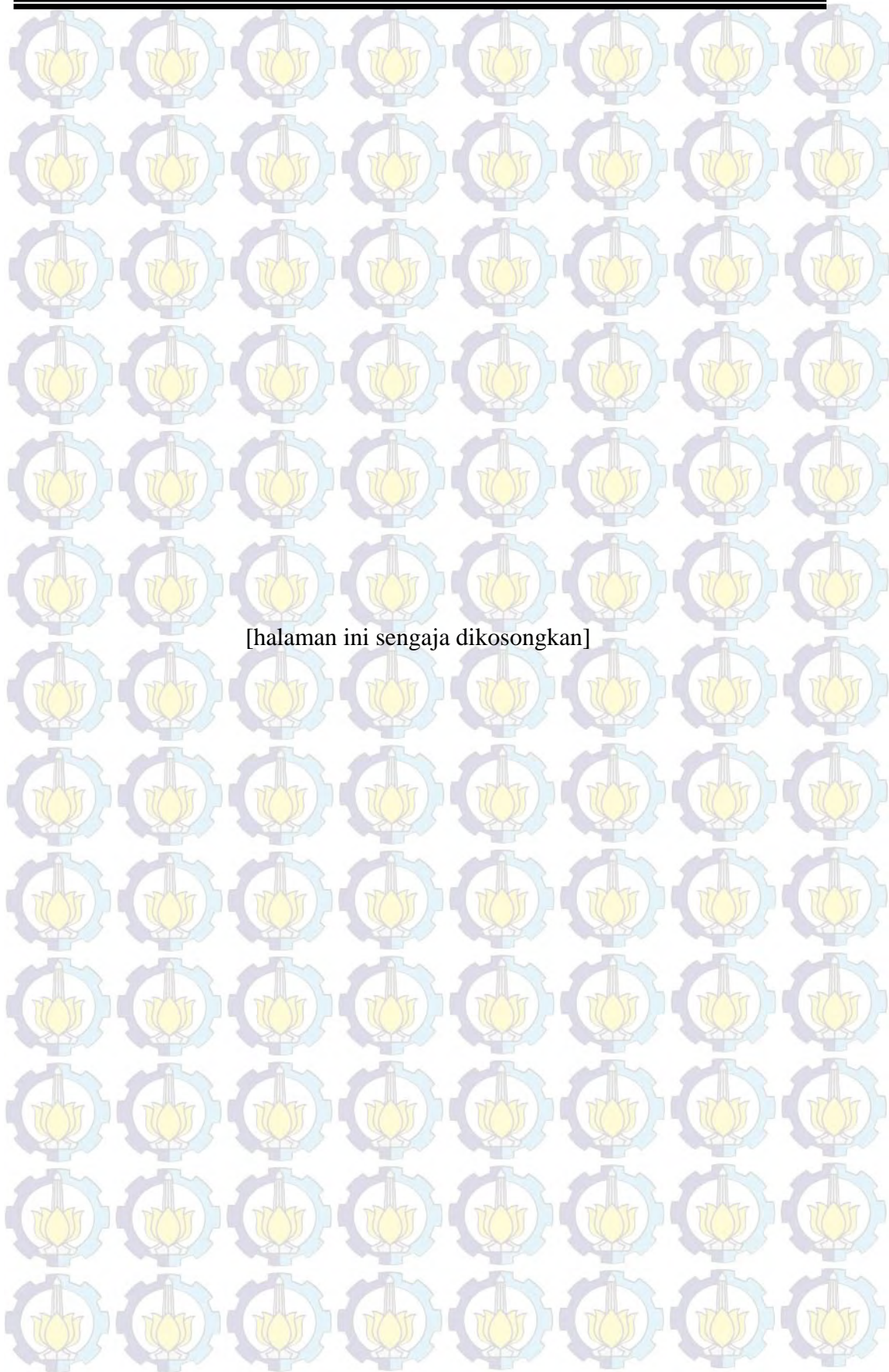
Tujuan dari penelitian ini berdasarkan pada rumusan masalah adalah untuk mengetahui pengaruh dari ON dan OV terhadap IPBK pada pemotongan baja perkakas Buderus 2080 dengan menggunakan WEDM.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenis dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang pengaruh dari ON dan OV terhadap IPBK pada baja perkakas Buderus 2080.
2. Meningkatkan pengetahuan tentang teknologi proses pemesinan WEDM untuk pembuatan komponen-komponen permesinan yang presisi.









## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Proses Pemesinan EDM

*Electrical discharge machining* (EDM) merupakan salah satu dari berbagai macam proses pemesinan non konvensional yang memanfaatkan energi termal. Proses pemesinan EDM sebagai proses pengerjaan material dengan menggunakan loncatan bunga api listrik di antara dua elektroda, yaitu elektroda benda kerja dan elektroda pahat yang memanfaatkan aliran cairan dielektrik selama proses berlangsung. Energi termal pada proses EDM disebabkan oleh proses peloncatan bunga api listrik pada celah antara elektrode dan benda kerja yang terjadi secara tidak kontinu tetapi periodik terhadap waktu (Pandey dan Shan, 1980).

Panas dari loncatan bunga api listrik akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja dan elektroda, yang kemudian terbawa oleh aliran cairan dielektrik. Selama proses pemesinan EDM tidak ada kontak langsung antara benda kerja dan elektroda, sehingga meminimalkan terjadinya tegangan mekanis, *chatter* dan getaran selama proses pemesinan berlangsung (Ho dan Newman, 2003). Dalam proses pemesinan EDM, besarnya laju pengerjaan bahan tidak dipengaruhi oleh kekerasan dari benda kerja, tetapi oleh temperatur leleh dari benda kerja itu sendiri. Hal ini menyebabkan proses EDM dapat digunakan untuk memproses benda kerja yang memiliki kekerasan sangat tinggi. Proses pemesinan EDM banyak digunakan dalam industri pembuatan *dies* dan *mould* untuk menghasilkan spesifikasi dimensi, geometris yang presisi dan kualitas permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan proses pemesinan konvensional.

Proses pemesinan EDM memiliki banyak keunggulan, antara lain (Pandey dan Shan, 1980):

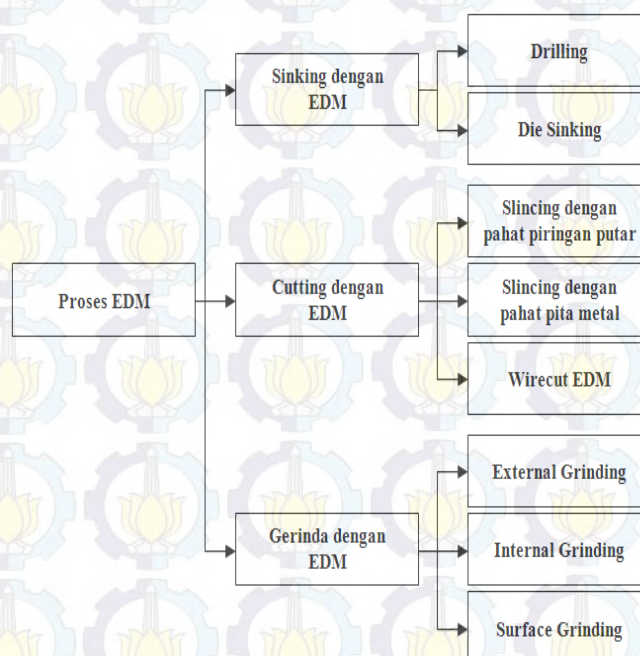
- a. Sifat fisis dan metalurgi diantaranya adalah kekuatan, ketangguhan, struktur mikro dan lain-lain tidak mempengaruhi proses pemesinan sehingga proses pemesinan ini dapat diaplikasikan pada material yang konduktif.





- b. Sebagian besar dari benda kerja tidak mengalami pemanasan meskipun pengerjaan material dilakukan dengan memanfaatkan efek termal.
- c. Mampu mengerjakan bentuk-bentuk benda kerja yang kompleks dengan derajat kepresisian yang tinggi dan kualitas permukaan yang sangat tinggi.
- d. Mampu mengerjakan benda kerja yang sangat keras.
- e. Faktor operator dalam menghasilkan kualitas benda kerja dapat diabaikan karena proses ini dijalankan secara otomatis.

Proses pemesinan EDM secara umum dikelompokkan menjadi beberapa jenis seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.1 (Pandey dan Shan, 1980).



Gambar 2.1 Klasifikasi proses pemesinan EDM

## 2.2 Prinsip Dasar WEDM

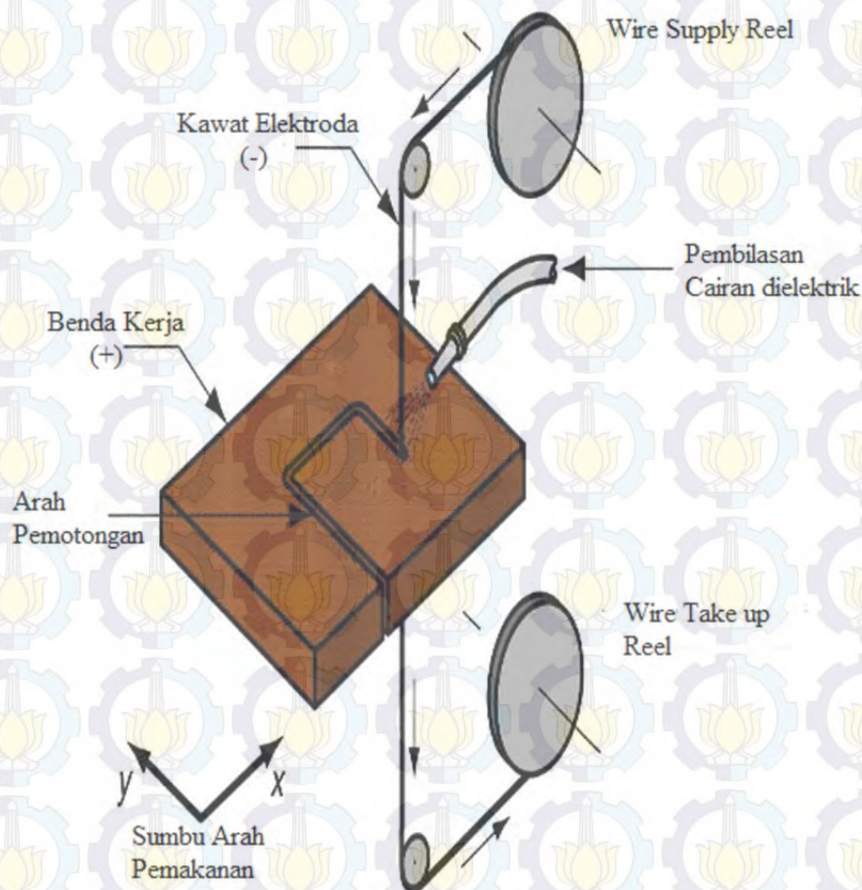
*Wire electrical discharge machining* (WEDM) adalah proses pengerjaan bahan non konvensional yang digunakan untuk memproduksi komponen dengan bentuk dan profil yang rumit. WEDM merupakan adaptasi dari proses EDM, yang menggunakan elektroda untuk mengawali proses percikan bunga api. Perbedaannya adalah WEDM menggunakan elektroda kawat yang terbuat dari tembaga, kuningan atau tungsten dengan diameter antara 0,05 mm sampai 0,3 mm. Mekanisme





pengerjaan bahan pada WEDM mirip dengan proses EDM yang melibatkan efek erosi yang dihasilkan oleh percikan bunga api listrik, tapi variabel proses pada keduanya tidak identik (Hoddk., 2004).

Pada proses WEDM, material tererosi dari benda kerja karena adanya serangkaian percikan bunga api listrik yang terjadi antara benda kerja dan elektroda berupa kawat yang dipisahkan oleh cairan dielektrik, yang secara berkelanjutan dimakankan pada zona pemotongan. Percikan bunga api listrik akan meloncat dari elektroda kawat yang merupakan kutub negatif menuju benda kerja yang merupakan kutub positif. Percikan bunga api listrik tersebut tidak terjadi secara berkelanjutan, tetapi periodik terhadap waktu. Proses WEDM dilakukan pada benda kerja yang terendam dalam tangki berisi cairan dielektrik yang memberikan kestabilan temperatur melalui penyemprotan (*flushing*). Prinsip dasar WEDM ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi pemotongan pada WEDM (author.uthm.edu.my)



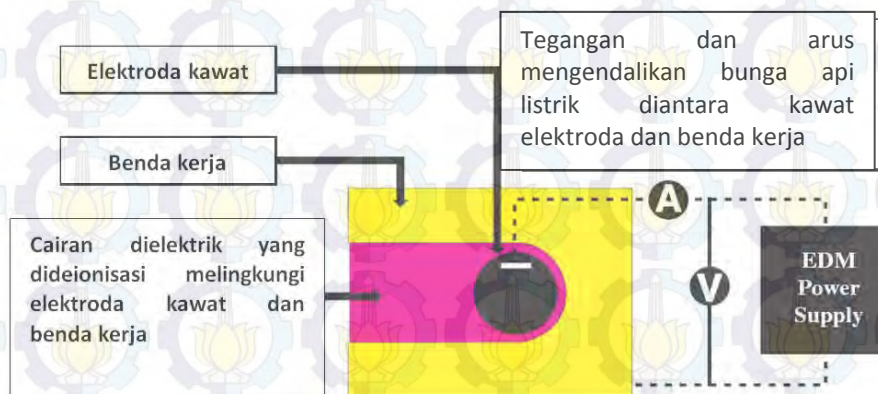


### 2.2.1 Mekanisme Pengerjaan Bahan

Proses WEDM memanfaatkan energi listrik menghasilkan saluran bunga api listrik antara katoda dan anoda, dan mengubahnya menjadi energi panas pada temperatur kisaran  $8000^{\circ}\text{C}$  sampai  $20.000^{\circ}\text{C}$ . Arus listrik menumbuk benda kerja dengan frekuensi antara 20.000 sampai 30.000 Hz (Ho dkk., 2004), dan menyebabkan benda kerja dan elektroda meleleh serta mengakibatkan terjadinya penguapan. Hal ini akan menimbulkan gelembung udara yang akan terus mengembang sesuai dengan kenaikan temperatur yang terjadi. Pelelehan dan penguapan yang terjadi pada benda kerja jauh lebih tinggi daripada pelelehan dan penguapan yang terjadi pada elektroda. Setelah terjadi loncatan bunga api listrik, aliran listrik akan terhenti sesaat memasuki *off time* (OFF). Hal ini akan menyebabkan terjadinya perubahan temperatur secara mendadak pada benda kerja dan elektroda. Pada saat itu juga, gelembung gas akan meledak dan terpecar keluar sehingga meninggalkan kawah-kawah halus pada permukaan material. Cairan dielektrik menyebabkan lelehan benda kerja dan elektroda akan membeku dengan cepat Hasil pembekuan itulah yang akan dibawa keluar oleh cairan dielektrik.

Secara sederhana urutan mengenai proses pengerjaan material pada WEDM diilustrasikan oleh Gambar 2.3 sebagai berikut (Sommer dan Sommer, 2005):

- 1) Tegangan dan arus listrik dihasilkan dari kawat yang dikelilingi oleh air deionisasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.

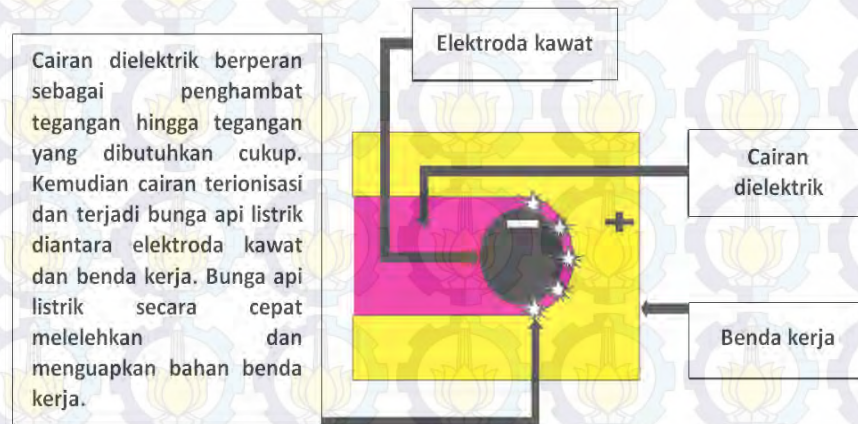


Gambar 2.3 Pembangkitan tegangan dan arus listrik oleh catu daya (Sommer dan Sommer, 2005)



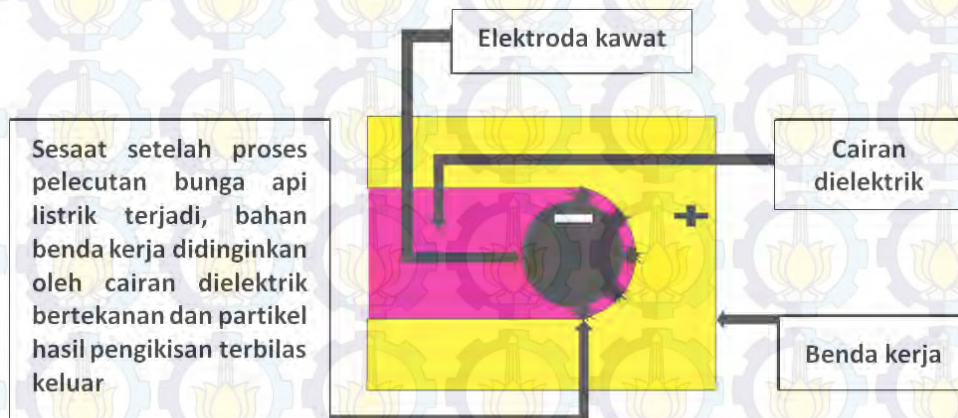


- 2) *Pulse on time* (ON) mengendalikan bunga api listrik yang dihasilkan oleh elektroda kawat dan benda kerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pengikisan material oleh bunga api listrik saat ON (Sommer dan Sommer, 2005)

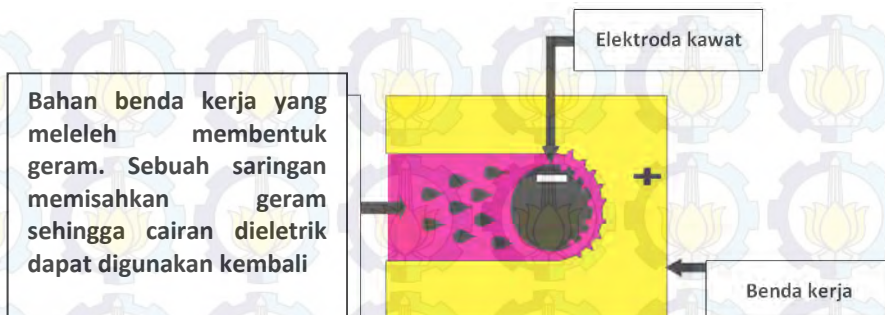
- 3) Selama OFF, cairan dielektrik bertekanan membilas material dari partikel hasil pengikisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Proses pengikisan material yang berhenti saat OFF (Sommer dan Sommer, 2005)

- 4) Sistem saringan digunakan untuk membilas partikel dari cairan dielektrik dan cairan tersebut digunakan kembali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.





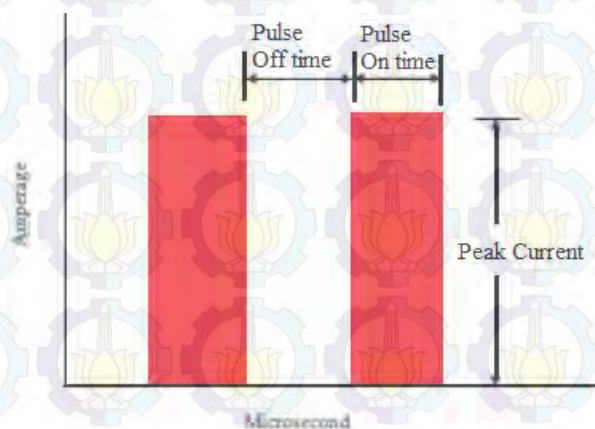
Gambar 2.6 Pembilasan geram oleh cairan dielektrik (Sommer dan Sommer, 2005)

### 2.3 Faktor-faktor pada proses pemesinan WEDM

Beberapa faktor pada proses WEDM menurut *Instruction Manual Book Wire-EDM CHMER CW32GF* adalah sebagai berikut:

#### 1. *Pulse on time* dan *pulse off time*

Pada proses pemesinan dengan WEDM, loncatan bunga api listrik terjadi selama *pulse on time* (ON) dan berhenti selama *pulse off time* (OFF) secara bergantian selama proses pemesinan berlangsung. Selama ON, tegangan diterapkan pada celah antara benda kerja dan kawat elektroda, sementara tidak ada tegangan yang ditempatkan selama OFF. Akibatnya, loncatan bunga api listrik terjadi hanya selama ON. Untuk memiliki durasi pelepasan bunga api listrik yang panjang, disarankan untuk memilih nilai ON yang besar, namun hal itu dapat menyebabkan terjadinya *konsleting*, yang mengakibatkan kawat elektroda putus (*rupture*). Untuk menghindari masalah tersebut, harus dimasukkan OFF. Ilustrasi ON dan OFF ditunjukkan pada gambar 2.7 (Ghodsieh dkk., 2013).



Gambar 2.7 Skema terjadinya ON dan OFF (Ghodsieh dkk., 2013)





## 2. *Open Voltage*

*Open voltage* (OV) adalah faktor yang mengatur perbedaan tegangan antara benda kerja dan kawat elektroda selama proses pemesinan. Semakin besar nilai OV semakin besar juga loncatan bunga api listrik. Namun, biasanya faktor ini tidak independen. Dengan kata lain nilai OV yang semakin tinggi akan diikuti dengan nilai *peak current* juga meningkat. Dalam beberapa mesin WEDM kedua faktor ini menunjukkan tegangan pemesinan.

## 3. *Servo voltage*

*Servo voltage* (SV) adalah tegangan yang diberikan untuk menghindari hubungan singkat yang mungkin terjadi. Hal ini dilakukan dengan cara mengatur jarak antara kawat elektroda dan benda kerja. Selama proses pemesinan, tegangan rata-rata pemesinan bervariasi tergantung pada keadaan proses pemesinan antara benda kerja dan elektroda. SV menetapkan nilai tegangan referensi untuk menjauhkan dan mendekatkan kawat elektroda dengan benda kerja. Jika tegangan pemesinan lebih tinggi dari tingkat tegangan referensi maka jarak kawat elektroda dan benda kerja ditambah, jika lebih rendah kawat maka jarak kawat elektroda dan benda kerja dikurangi, lebih tepatnya meja kerja yang bergerak menjauh atau mendekat bukan kawat. Semakin tinggi nilai untuk SV, semakin besar juga celah antara benda kerja dan elektroda. Semakin tinggi nilai SV juga mengurangi jumlah bunga api listrik yang terjadi dalam satuan waktu tertentu. Hal ini dapat menstabilkan pelepasan listrik, meskipun laju pemesinan menjadi melambat.

## 4. *Servo feed rate*

*Servo feed rate* (SF) menentukan laju pemakanan dari meja kerja selama proses pemesinan. Umumnya pada WEDM faktor SV diatur secara otomatis. Dalam proses pemesinan meja kerja memiliki kecepatan konstan tanpa memperhatikan SV. Jadi servo voltage dan SF dapat mempengaruhi laju pemakanan.

## 5. *Dielectric flow rate*

*Flushing* adalah penyirkulasian dari cairan dielektrik yang dialirkan pada celah diantara elektroda dan benda kerja. Cairan dielektrik berfungsi sebagai pembilas. Untuk mendapatkan percikan listrik yang stabil, diperlukan cairan dielektrik. Dalam cairan dielektrik, percikan listrik dapat distabilkan melalui pendinginan yang efisien





dan pembuangan geram. Pembilasan geram yang tidak sempurna akan menyebabkan penimbunan geram. Penimbunan geram tersebut akan menyebabkan loncatan bunga api listrik menjadi tidak teratur sehingga merusak benda kerja dan elektroda. *Deionized water* biasanya digunakan sebagai cairan dielektrik dalam WEDM karena sifatnya yang ramah lingkungan.

#### 6. *Wire feed*

*Wire feed* (WF) merupakan parameter penting dalam WEDM yang menunjukkan kecepatan pemakanan kawat pada WEDM. WF tinggi mengakibatkan konsumsi kawat dan biaya pemesinan akan meningkat. Sementara jika WF rendah dapat menyebabkan kawat putus (*rupture*) pada kecepatan potong tinggi.

#### 7. *Low power*

*Low power* adalah faktor yang mengatur jenis sumber energi pemotongan (AC atau DC) dan besarnya energi tersebut.

#### 8. *Arc on time*

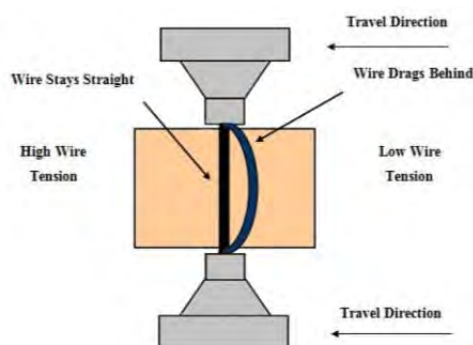
*Arc on time* adalah faktor yang mengatur besarnya arus tambahan.

#### 9. *Arc off time*

*Arc off time* adalah faktor yang mengatur frekuensi arus tambahan tersebut.

#### 10. Ketegangan kawat

Ketegangan kawat adalah faktor yang dapat mengontrol ketegangan kawat pada mesin WEDM. Ketegangan kawat cukup tinggi, membuat kawat tetap tertarik lurus. Jika ketegangan kawat terlalu rendah, maka kawat akan tertarik dibelakang holder seperti ditunjukkan dalam gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hubungan antara *wire drag* dan ketegangan kawat (Ghodsiyeh dkk., 2013)





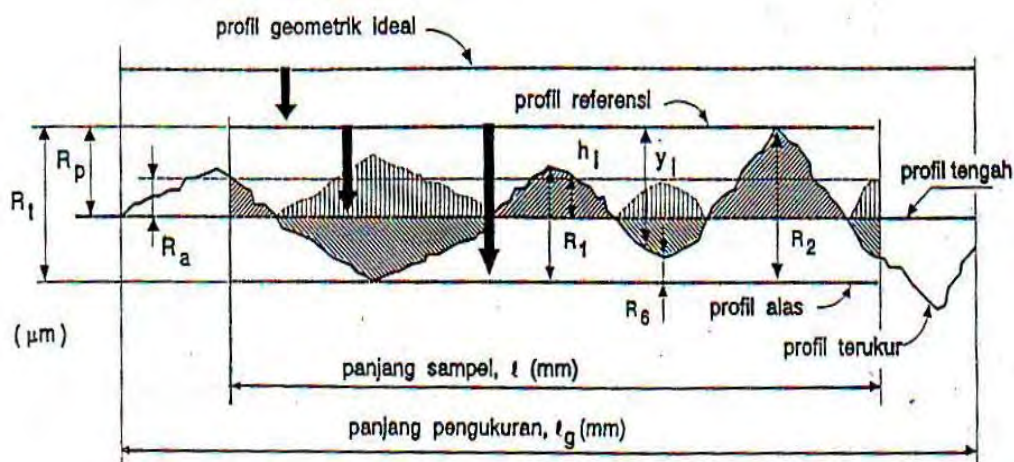
## 11. *Feedrate mode* (FM) dan *feedrate* (F)

*Feedrate mode* adalah faktor yang digunakan untuk memilih kecepatan pemakanan servo atau kecepatan pemakanan konstan, sedangkan *feedrate* adalah faktor yang digunakan untuk menentukan kecepatan pemakanan yang konstan.

### 2.4 Integritas Permukaan Benda Kerja

#### 2.4.1 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan (KP) didefinisikan sebagai ketidakaturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Konfigurasi permukaan yang dihasilkan dari proses WEDM adalah konfigurasi permukaan yang bentuknya berupa kawah-kawah kecil pada suatu permukaan. Besar kecilnya kawah yang dihasilkan pada proses WEDM tergantung pada energi listrik yang terkandung pada setiap loncatan bunga api listrik (Ghodisiyeh dkk., 2013). KP terjadi karena terjadinya berbagai penyimpangan selama proses pemesinan, sehingga permukaan yang mempunyai bentuk sempurna tidak dapat dibuat. Posisi  $R_a$ , bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)

Keterangan Gambar 2.9 adalah sebagai berikut:

a. Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)

Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses





pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran dan garis lengkung.

b. Profil Referensi/Acuan/Puncak (*Reference Profile*)

Profil ini digunakan sebagai acuan untuk menganalisis ketidakrataan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometrik ideal, serta menyinggung puncak tertinggi tertinggi profil terukur dalam suatu panjang sampel.

c. Profil Terukur (*Measured Profile*)

Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan terukur.

d. Profil Alas (*Root Profile*)

Profil alas adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sehingga menyinggung pada titik paling terendah profil terukur.

e. Profil Tengah (*Center Profile*)

Profil tengah merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometrik ideal pada suatu panjang sampel) sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai profil terukur sama dengan jumlah luas daerah-daerah dibawah profil tengah sampai profil terukur.

Berdasarkan profil-profil yang diterangkan diatas, dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan, yaitu yang berhubungan dengan dimensi pada arah tegak dan arah memanjang/ mendatar. Untuk dimensi arah tegak dikenal beberapa parameter (Rochim, 2001), yaitu:

a. Kekasaran Total ( $R_t$ )

Kekasaran total adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.

b. Kekasaran Perataan ( $R_p$ )

Kekasaran perataan adalah jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur.

$$R_p = \frac{1}{l} \int_0^l y_i dx \quad (2.1)$$





c. Kekasaran Rata-rata Aritmatik ( $R_a$ )

Kekasaran rata-rata aritmatik adalah harga rata-rata jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Secara umum  $R_a$  dirumuskan sebagai:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |hi| dx \quad (2.2)$$

Harga  $R_a$  tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n |hi| \quad (2.3)$$

$$R_a = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{l} \quad (2.4)$$

Dengan:

$R_a$  : nilai kekasaran aritmatika.

$h_n$  : tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba.

$n$  : frekuensi pengukuran.

$l$  : panjang sampel yang telah ditentukan.

Dari bermacam-macam parameter permukaan yang disebutkan diatas, parameter  $R_a$  relatif lebih banyak digunakan untuk mengidentifikasi permukaan. Hal ini dikarenakan harga  $R_a$  lebih sensitif terhadap perubahan/penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan. Dengan demikian, jika ada tanda-tanda kenaikan kekasaran maka pencegahan dapat cepat dilakukan.

ISO telah mengklasifikasikan nilai kekasaran rata-rata aritmetik ( $R_a$ ) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5. Angka kekasaran permukaan ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan satuan harga kekasaran permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga  $R_a$  atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO.





Tabel 2.1 Angka Kekasaran dan Panjang Sampel Standar

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)	Keterangan
50	N12	8	Sangat kasar
25	N11		
12,5	N10	2,5	Kasar
6,3	N9		
3,2	N8	0,8	Normal
1,6	N7		
0,8	N6		
0,4	N5		
0,2	N4		
0,1	N3	0,25	Halus
0,05	N2		
0,025	N1	0,08	Sangat halus

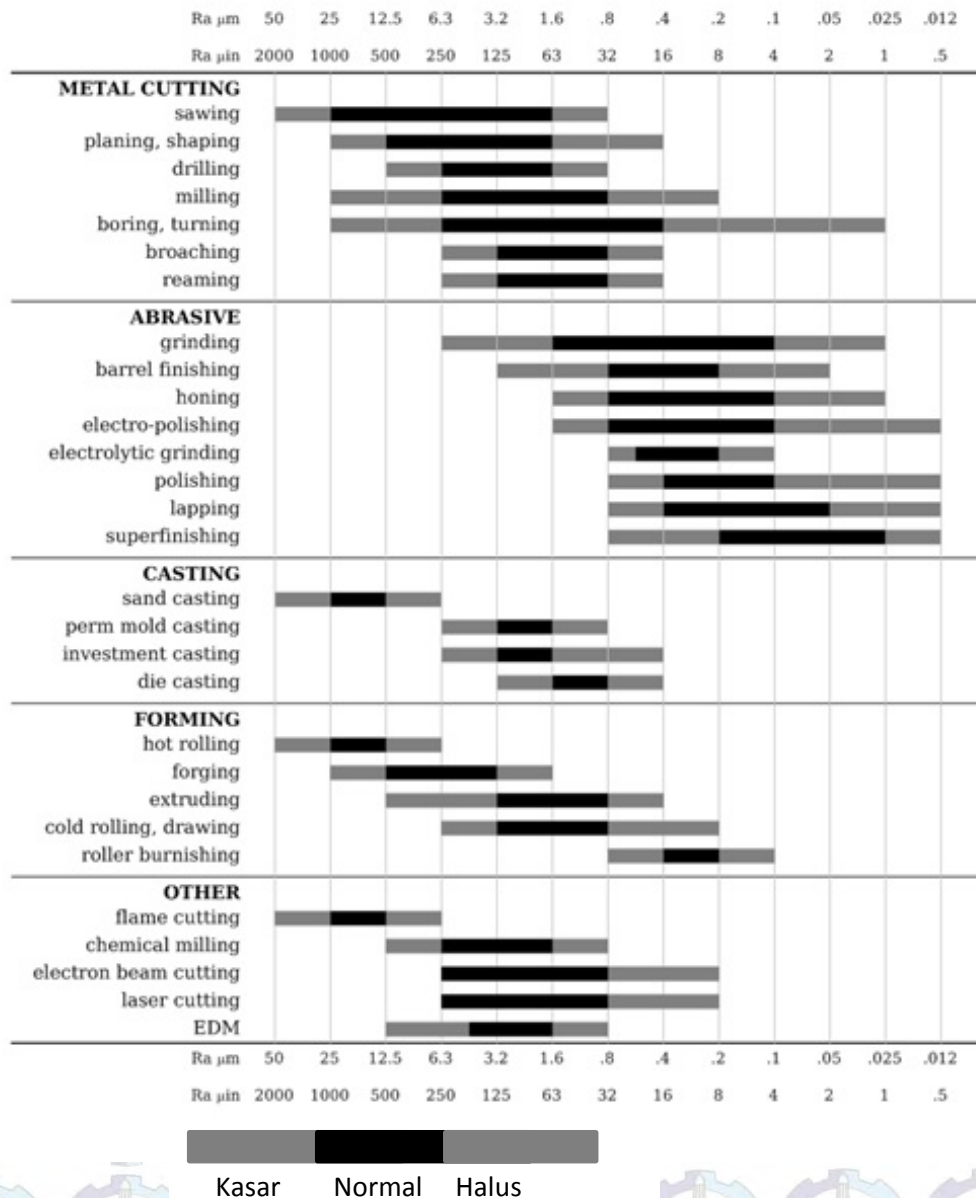
Sumber: Rochim, 2001

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan ditunjukkan pada Tabel 2.2 (Rochim, 1993).





Tabel 2.2 Nilai Kekasaran yang Dicapai Oleh Beberapa Pengerjaan



Sumber: Rochim, 1993

Keterangan:

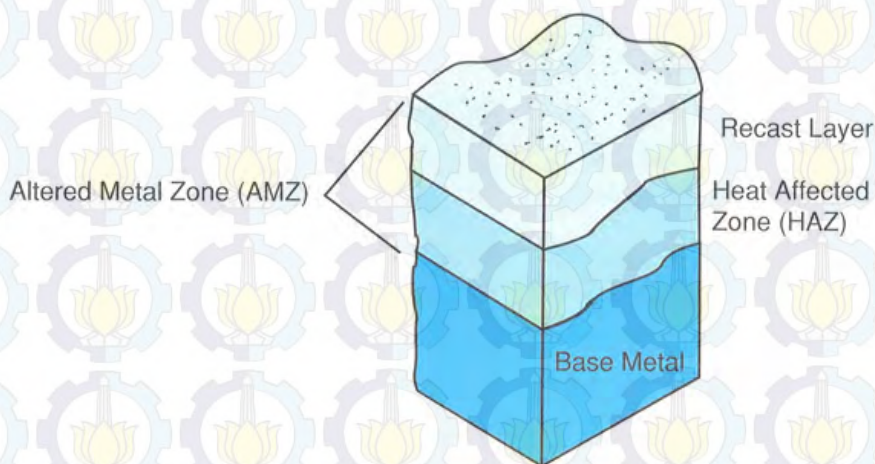
- Kasar : nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan kasar.
- Normal : nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan normal.
- Halus : nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan khusus.





#### 2.4.2 Lapisan *Recast*

Lapisan *recast* (LR) merupakan lapisan putih yang terbentuk pada permukaan benda kerja akibat dari pengaruh panas yang ditimbulkan oleh loncatan bunga api listrik dari kawat elektroda (Guitrau, 1997). Selain itu, lapisan *recast* merupakan sisa dari lapisan utama material induk yang terkikis akibat percikan bunga api listrik dari kawat elektroda melalui media cairan dielektrik. Benda kerja yang mengalami proses pemesian dengan WEDM memiliki kekerasan yang tidak lagi homogen. Lapisan *recast* tidak mungkin dihilangkan dalam proses pemesian WEDM sehingga pengaturan faktor-faktor yang ada hanya dapat meminimalkan ketebalan lapisan *recast* yang terbentuk. Ilustrasi lapisan material yang terjadi selama proses pemesian WEDM ditunjukkan pada gambar 2.10.



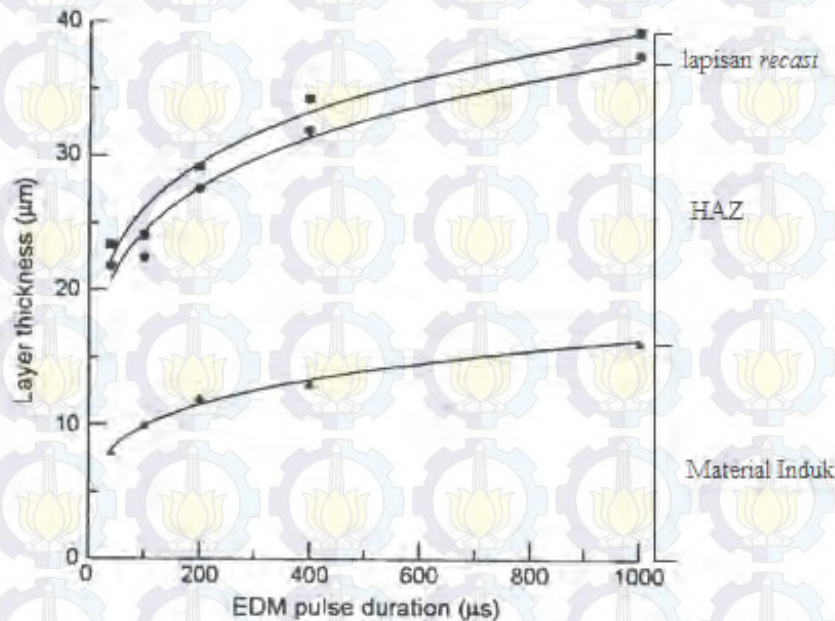
Gambar 2.10 Lapisan material yang terjadi pada proses WEDM (edmttechman.com)

Pada permukaan hasil EDM terdapat 3 lapisan permukaan. Lapisan *recast*, lapisan HAZ dan material induk. Lapisan *recast* merupakan struktur paling atas dari lapisan permukaan benda kerja hasil pemotongan. Pada lapisan *recast*, benda kerja mengalami pencairan dan pembekuan kembali (*melted and resolidified layer*) dengan cepat akibat dari proses pembilasan. (Uddeholm, 2007). Pada lapisan HAZ memiliki kecenderungan bersifat sangat keras dan getas. Pada lapisan ini panas yang dihasilkan selama proses pemesian tidak cukup untuk melelehkan logam, namun cukup untuk membuat terjadinya transformasi mikrostruktur. Indikasi besarnya lapisan-lapisan ini ditunjukkan pada Gambar 2.9. Kedalaman lapisan *recast* nilainya





hampir sama, sedangkan lapisan HAZ kedalamannya dua kali lipat. Kedalaman semua lapisan berbanding lurus dengan durasi *pulse* (Davim, 2009).



Gambar 2.11 Hubungan antara ketebalan lapisan dan durasi pulse pada EDM (Davim, 2009)

### 2.4.3 Kekerasan mikro

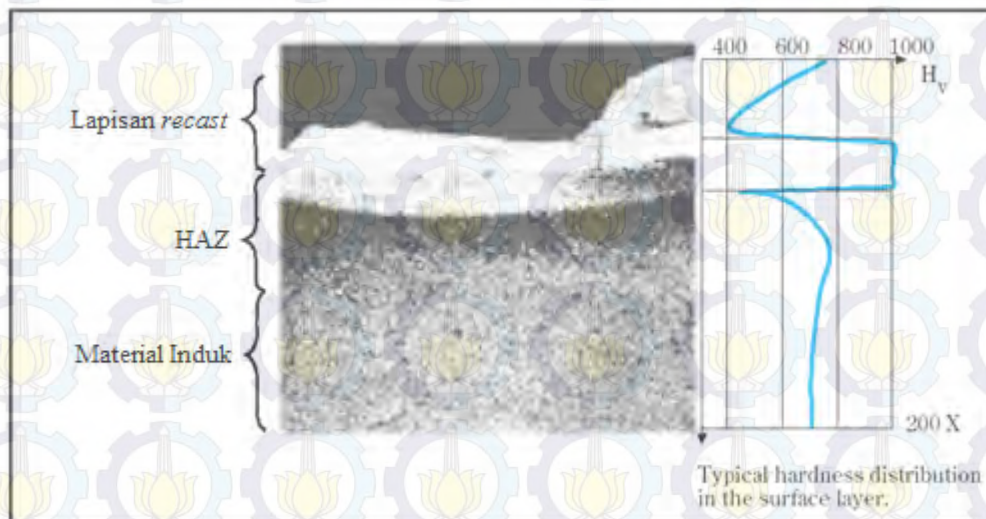
Kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi, baik deformasi plastis maupun deformasi permanen. Kekerasan mikro adalah kekerasan pada suatu material yang dihasilkan oleh sebuah gaya dari penumbuk pada permukaan sebuah material dengan pembebanan yang sangat ringan, biasanya lekukan yang diakibatkan berukuran sangat kecil.

Gambar 2.9 menunjukkan distribusi kekerasan pada benda kerja hasil proses pemesian dengan WEDM. Struktur paling atas dari lapisan permukaan benda kerja hasil pemotongan adalah lapisan yang mencair dan membeku kembali dengan cepat (*melted and resolidified layer*) akibat dari proses pembilasan. Lapisan ini juga biasa disebut sebagai LR. Kedua lapisan ini termasuk dalam lapisan HAZ. Lapisan ini juga terpengaruh panas tetapi tidak sampai mencair, kemudian mengalami pengerasan kembali (Uddeholm, 2007). Lapisan *recast* dan HAZ telah mengalami perubahan struktur kristal karena pengaruh panas selama proses pemesian berlangsung. Hal ini





menyebabkan struktur kristal baru yang terbentuk berbeda dengan struktur kristal material induk sehingga bersifat sangat keras dan getas. Selain itu ketidakhomogenan kekerasan pada benda kerja hasil proses pemesinan dengan WEDM juga disebabkan oleh terjadinya perubahan komposisi unsur kimia pada LR, sehingga kekerasan antara LR dan material induk berbeda (Newton dkk., 2009).



Gambar 2.12 Kekerasan tiap lapisan pada benda kerja hasil WEDM (Uddeholm, 2007)

#### 2.4.3.1 Uji Kekerasan Vickers

Uji kekerasan Vickers dikembangkan di Inggris pada tahun 1925. Uji kekerasan Vickers menggunakan penumbuk piramida intan, pada bagian dasar berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut antara permukaan piramida adalah  $136^\circ$ . Angka kekerasan Vickers (VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan (Dieter, 1987). VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$VHN = \frac{2P \sin(\frac{\theta}{2})}{L^2} = \frac{1,854P}{L^2} \quad (2.6)$$

Dengan ;

$P$  = beban yang ditetapkan.

$L$  = panjang diagonal rata-rata,  $\mu\text{m}$ .

$\theta$  = sudut antara bidang yang berhadapan pada intan  $136^\circ$ .





Kedalaman indentasi pada pengujian Vickers *microhardness* dapat diukur menggunakan persamaan berikut:

$$D = \tan 22^\circ \cdot b \quad (2.7)$$

Nilai  $b$  didapat dari persamaan berikut

$$b = 0,5 \sqrt{0,5d_1^2 + 0,5d_2^2} \quad (2.8)$$

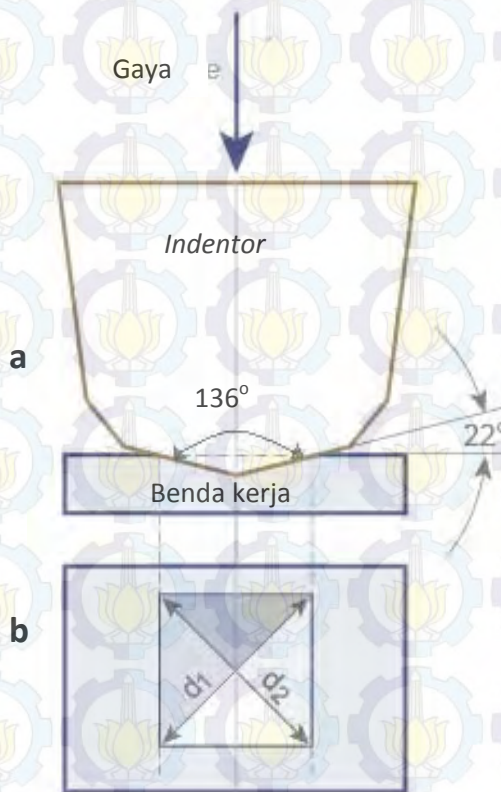
Dengan :

$D$  = kedalaman indentasi,  $\mu\text{m}$ .

$d_1$  = diagonal indenter 1,  $\mu\text{m}$ .

$d_2$  = diagonal indenter 2,  $\mu\text{m}$

$b$  = panjang setengah diagonal indenter.



Gambar 2.13 (a) ilustrasi penekanan Vickers (b) pengukuran diagonal pada jejak indentasi

Uji kekerasan Vickers banyak dilakukan dalam penelitian, karena metode ini menghasilkan skala kekerasan yang berkelanjutan untuk suatu pembebanan tertentu.

Untuk logam yang sangat lunak memiliki nilai kekerasan 5 VHN, hingga logam yang





sangat keras memiliki nilai kekerasan 1500 VHN. Ada dua rentang pembenan gaya pada pengujian Vickers. Rentang pertama adalah untuk pengujian mikro yang mengacu pada standar ASTM E384 dengan pembebanan pada benda kerja sebesar  $9.8 \cdot 10^{-3}$  sampai 9.8 N (1gf sampai 1000 gf), sedangkan untuk pengujian makro 1 kg sampai 100 kg mengacu pada standar ASTM E92. Ilustrasi penekanan pada uji kekerasan Vickers dan pengukuran permukaan piramida intan ditunjukkan pada Gambar 2.10.

## **2.5 Kawat Elektroda**

Pemilihan jenis kawat pada dasarnya tergantung pada sifat fisik dan mekanis dari benda kerja. Kawat elektroda yang ideal harus memiliki karakteristik seperti konduktivitas listrik yang baik dan kekuatan tarik yang tinggi (Guiraud, 1997). Jenis material kawat yang umumnya digunakan pada mesin WEDM adalah:

### **2.5.1 Kuningan**

Kawat WEDM jenis kuningan merupakan perpaduan dari unsur tembaga (Cu) dan seng (Zn), dan pada umumnya memiliki paduan unsur tembaga sebesar 63 % sampai 65% dan paduan unsur seng sebesar 35% sampai 37%. Penambahan seng memberikan kekuatan tarik dan titik uap yang lebih tinggi, serta titik leleh yang lebih rendah. Hal ini bertujuan untuk mengimbangi kerugian karena konduktivitas. Elektroda kuningan dengan cepat menjadi bahan elektroda yang paling banyak digunakan dalam industri pengguna WEDM.

### **2.5.2 Tembaga**

Tembaga merupakan jenis kawat yang pertama kali digunakan dalam penggunaan WEDM. Meskipun tingkat konduktivitasnya yang sangat baik, namun memiliki kekuatan tarik yang rendah, titik leleh tinggi dan tekanan penguapan yang rendah.

### **2.5.3 Kawat yang dilapisi (*Coated Wire*)**

Karena kawat kuningan tidak dapat dibuat dengan konsentrasi yang lebih tinggi dari seng secara efisien, maka dikembangkan kawat yang dilapisi (*coated wire*),





kawat jenis ini kadang-kadang disebut juga dengan nama kawat sepuh (*platted*) mengingat cara pembuatannya melalui proses *electroplating*. *Coated wire* umumnya memiliki inti kuningan atau tembaga. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas dan kekuatan tarik. *Coated wire* umumnya dilapisi dengan lapisan seng, baik seng murni atau campuran (*zinc alloy*). Hal ini bertujuan untuk meningkatkan pembentukan percikan bunga api listrik dan karakteristik penyemprotan (*flushing*). Laju pengerjaan bahan dan kekuatan tarik pada kawat jenis ini lebih baik secara signifikan, jika dibandingkan dengan kawat sejenis yang tanpa pelapisan (*uncoated wire*). *Coated wire* sekarang memiliki beragam material inti, bahan pelapisan dan kedalaman pelapisan yang beragam. Umumnya kawat yang sering digunakan adalah jenis *zinc coated brass wire*.

## **2.6 Desain Eksperimen**

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, maka faktor dan level faktor dibuat bervariasi. Hasil dari kombinasi eksperimen tertentu diamati dan dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh.

Secara umum, desain eksperimen faktorial dibagi menjadi tiga tahap utama (Iryawan, 2006), yaitu:

### **2.6.1 Tahap Perencanaan**

Langkah-langkah pada tahap ini adalah sebagai berikut:

#### **a. Perumusan Masalah**

Perumusan masalah harus didefinisikan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.

#### **b. Penentuan Tujuan Eksperimen**

Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dinyatakan pada perumusan masalah.





c. Penentuan Variabel Tak Bebas/Variabel Respon

Faktor/variabel respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain. Dalam desain eksperimen faktorial, respon adalah karakteristik kualitas yang terdiri dari dua kategori, yaitu:

- 1) Karakteristik yang dapat diukur, yaitu semua hasil akhir yang dapat diukur dengan skala kontinyu. Contohnya adalah temperatur, berat, tekanan, dan lain-lain.
- 2) Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinyu, tetapi dapat diklasifikasikan secara berkelompok. Contohnya adalah retak, jelek, baik, dan lain-lain.

d. Pengidentifikasian Faktor/Variabel Bebas

Faktor/variabel bebas adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan Faktor/Variabel Kontrol dan Faktor/Variabel Gangguan

Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen faktorial, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan, sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

f. Penentuan Jumlah Level dan Nilai Level Faktor/Variabel

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti, maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.





### 2.6.2 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan meliputi penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

a. Jumlah Replikasi

Replikasi adalah pengulangan perlakuan yang sama dalam suatu percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi. Replikasi ditujukan untuk mengurangi tingkat kesalahan pada eksperimen dan memperoleh harga taksiran dari kesalahan sebuah eksperimen.

b. Randomisasi

Dalam sebuah eksperimen, ada pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan, seperti kelelahan operator, fluktuasi daya mesin dan lain-lain. Pengaruh tersebut dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Secara umum, randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- 1) Meratakan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen.
- 2) Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan, sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.
- 3) Mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain.

Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

### 2.6.3 Tahap Analisis

Tahap analisis meliputi pengumpulan data, pengaturan data dan perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, juga dilakukan perhitungan dan pengujian data statistik pada data hasil eksperimen.





a. Analisis variansi (ANAVA)

Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik. Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi faktor. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi (ANAVA) dua arah digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA dua arah terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (db), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS) dan  $F_{hitung}$  seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Tabel Analisis Variansi (ANAVA) Dua Arah

Sumber Variasi	<i>Sum of Square</i> (SS)	<i>Degree of Freedom</i> (v)	<i>Mean Square</i> (MS)	$F_{Ratio}$ ( $F_0$ )
Faktor A	$SS_A = n_{A_i}(\bar{A} - \bar{y})^2$	$k_A - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{k_A - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Faktor B	$SS_B = n_{B_i}(\bar{B} - \bar{y})^2$	$k_B - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{k_B - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Error	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$	$v_e = v_T - v_A - v_B$	$MS_E = \frac{SS_E}{k_A k_B (n - 1)}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	$N - 1$		

Sumber: Ross, 2008

Keterangan:

$k_A$  = banyaknya level pada faktor A





$k_B$  = banyaknya level pada faktor B

$n_A$  = banyaknya replikasi faktor A

$n_B$  = banyaknya replikasi faktor B

$N$  = jumlah total percobaan

b. Uji Distribusi F

Pengujian uji distribusi F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan *error*. Variansi *error* adalah variansi dari setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan (Soejanto, 2009). Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

$H_1$  : sedikitnya ada satu pasangan  $\mu$  yang tidak sama

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 1991):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.9)$$

Oleh karena itu, hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

Untuk taraf faktor A  $\rightarrow H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau_i \neq 0$$

Untuk taraf faktor B  $\rightarrow H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0$$

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta tidak ada interaksi antara faktor A dengan faktor B, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon serta adanya interaksi antara faktor A dengan





faktor B. Kegagalan menolak atau penolakan  $H_0$  berdasarkan pada nilai  $F_{hitung}$  yang dirumuskan:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.10)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.11)$$

Kegagalan menolak  $H_0$  pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi berikut:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.12)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.13)$$

Bila menggunakan perangkat lunak statistik, kegagalan menolak  $H_0$  dilakukan jika  $P_{value}$  lebih besar daripada  $\alpha$  (taraf signifikansi). Kegagalan menolak  $H_0$  bisa juga dilakukan apabila nilai  $F_{hitung} > 2$  (Park, 1996).

#### c. Pengujian Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ . Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), mempunyai *mean* nol dan varians yang konstan  $\sigma^2$  (identik), serta berdistribusi normal atau  $\varepsilon_i \sim IIDN(0, \sigma^2 I)$ . Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak.

##### 1. Pengujian Independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan plot ACF (*Auto Correlation Function*).

##### 2. Pengujian Identik

Pengujian varian identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot  $e_i$  terhadap  $\hat{Y}_i$  (secara visual). Jika penyebaran datanya acak





(menyebar disekitar garis nol) dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

### 3. Pengujian Distribusi Normal

Normal *probability plot* pada perangkat komputasi statistik dapat digunakan untuk menyatakan residual suatu respon berdistribusi normal atau tidak. Kolmogorov-Smirnov *normality test* digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : residual berdistribusi normal.

$H_1$  : residual tidak berdistribusi normal.

$H_0$  gagal ditolak apabila  $P_{\text{value}} > \alpha$ .

## 2.7 Metode Faktorial

Dalam statistika, eksperimen faktorial adalah percobaan yang terdiri dari 2 faktor atau lebih yang masing-masing faktor mempunyai level tertentu. Setiap unit percobaan mengambil semua kemungkinan kombinasi pada tiap-tiap level setiap faktor. Dalam pelaksanaannya percobaan faktorial harus dilakukan secara acak untuk mengurangi bias pada hasil. Metode ini pertama kali digunakan oleh John Bennet Lawes dan Joseph Henry Gilbert pada abad 19 pada percobaan stasiun Rothamsted. Percobaan yang didasarkan pada rancangan faktorial memungkinkan peneliti untuk mempelajari pengaruh setiap faktor terhadap variabel respon, serta efek dari interaksi antara faktor-faktor pada variabel respon. Tabel 2.4 menunjukkan percobaan faktorial dengan dua replikasi. Percobaan ini mencakup dua faktor dengan masing-masing faktor memiliki tiga level.





Tabel 2.4 Susunan Data Untuk Sebuah Rancangan Faktorial Tiga Faktor

Faktor		Respon	
A	B	Replikasi 1	Replikasi 2
Level 1	Level 1	$X_{111}$	$X_{112}$
	Level 2	$X_{121}$	$X_{122}$
	Level 3	$X_{131}$	$X_{132}$
Level 2	Level 1	$X_{211}$	$X_{212}$
	Level 2	$X_{221}$	$X_{222}$
	Level 3	$X_{231}$	$X_{232}$
Level 3	Level 1	$X_{311}$	$X_{312}$
	Level 2	$X_{321}$	$X_{322}$
	Level 3	$X_{331}$	$X_{332}$



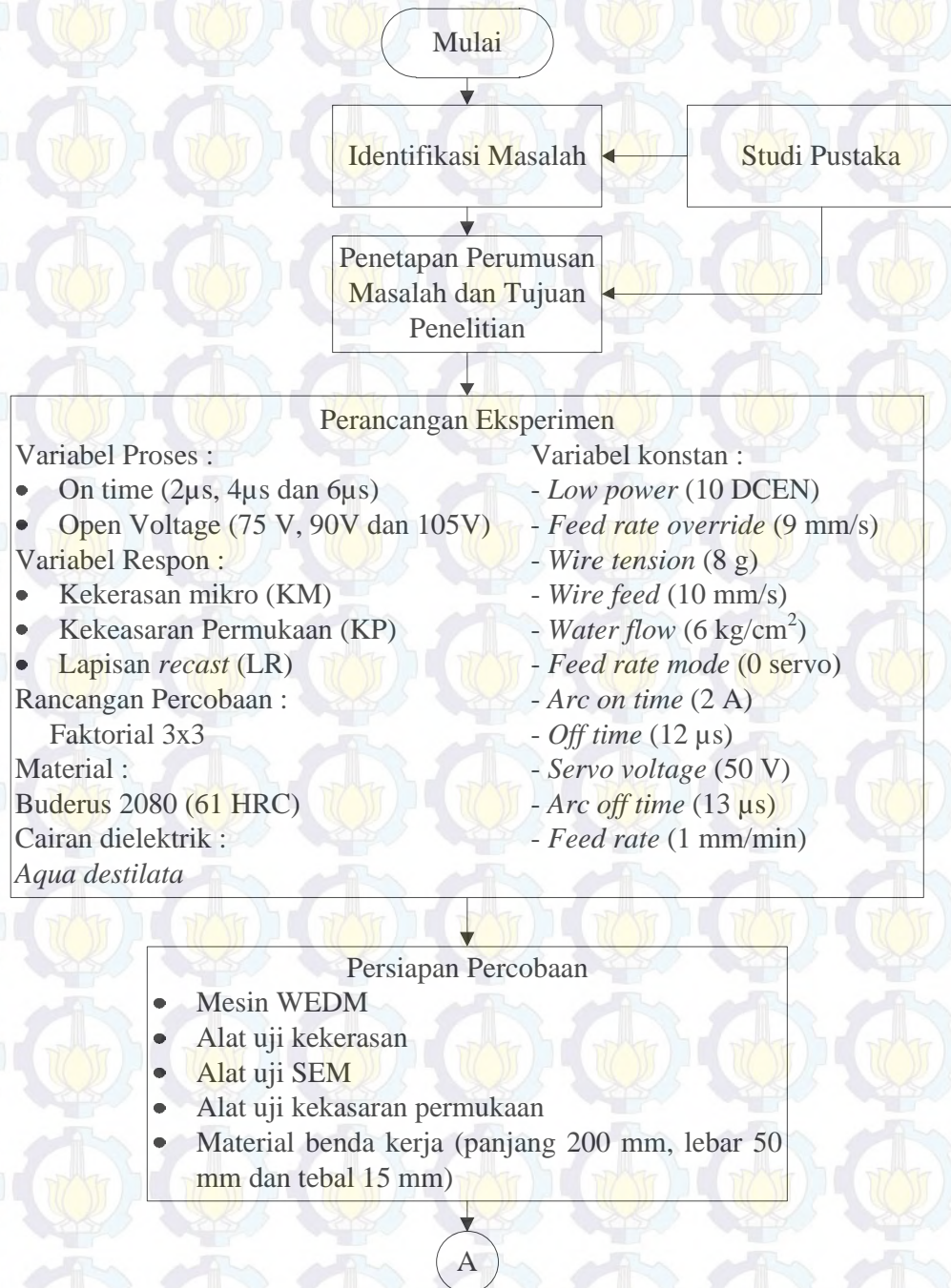


## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan pada pelaksanaan tesis ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian (lanjutan)





### 3.2 Faktor-faktor dalam Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari hasil eksperimen. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Variabel proses

Variabel bebas atau biasa disebut juga sebagai faktor kontrol merupakan faktor yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan dari penelitian yang dilakukan dan pertimbangan yang lain. Faktor kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. *On time* (ON)
- b. *Open voltage* (OV)

#### 2. Variabel Respon

Variabel respon merupakan respon yang diamati dalam penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini variabel respon yang diamati adalah:

- a. Kekerasan mikro (KM)
- b. Kekasaran permukaan (KP)
- c. Lapisan *recast* (RL)

#### 3. Faktor Konstan

Faktor konstan merupakan faktor yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai faktor ini dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Faktor konstan pada penelitian ini adalah:

- a. *Low power* (10 DCEN)
- b. *Arc off time* (13  $\mu$ s)
- c. *Feed rate override* (9mm/s)
- d. *Wire tension* (8 g)
- e. *Wire feed* (10 mm/s)
- f. *Water Flow* (6 kg/cm<sup>2</sup>)
- g. *Feed rate mode* (0 servo)
- h. *Feed rate* (1mm/s)
- i. *Arc on time* (2 A)
- j. *Off time* (12  $\mu$ s)





k. *Servo voltage* (50V)

### 3.3 Faktor Noise

Faktor *noise* adalah faktor gangguan yang memiliki pengaruh terhadap respon, tetapi sangat sulit untuk dikendalikan. Faktor-faktor yang mungkin menjadi *noise* dalam penelitian ini adalah temperatur cairan dielektrik, konsentrasi geram dalam cairan dielektrik dan kondisi permukaan kawat elektroda. Faktor-faktor ini tidak dimasukkan ke dalam rancangan percobaan, sehingga pengambilan data dilakukan dengan replikasi untuk mengatasi pengaruh faktor *noise* pada hasil penelitian.

### 3.4 Bahan dan Peralatan

Percobaan dilakukan untuk memperoleh data respon yang nilainya akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Sebelum melakukan percobaan dilakukan persiapan-persiapan terhadap benda kerja, kawat (elektroda), mesin WEDM, peralatan untuk pengukuran dan peralatan bantu yang digunakan.

#### 3.4.1 Bahan Penelitian

Informasi lengkap mengenai bahan penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

##### 1. Benda kerja

Material yang digunakan adalah baja perkakas Buderus 2080. Material ini memiliki kekerasan 61 HRC (setelah mengalami prose pengerasan) dengan panjang 200 mm, lebar 30 mm dan lebar 15 mm. Komposisi kimia dari baja perkakas Buderus 2080 dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut

Tabel 3.1 komposisi kimia baja perkakas buderus 2080

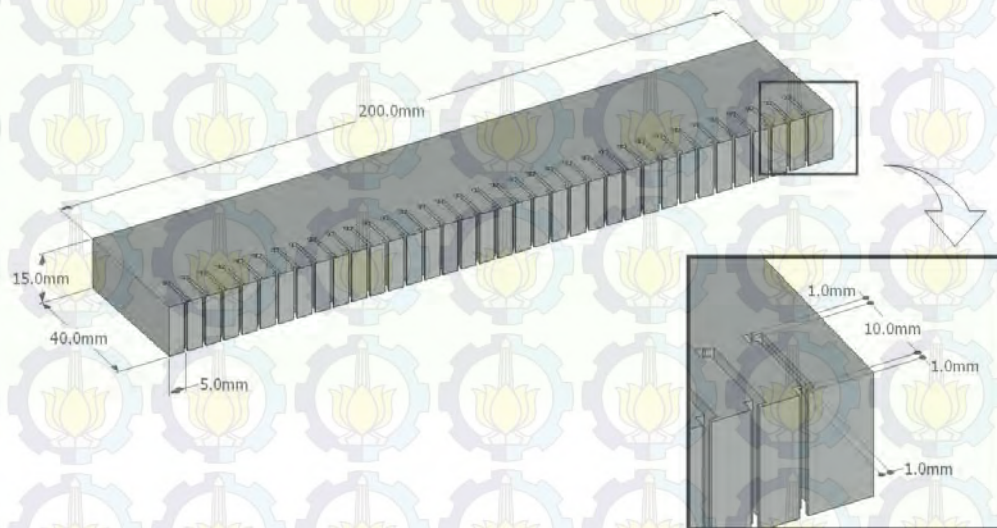
Unsur kimia	C	Si	Mn	Cr
Komposisi (%)	1,90 - 2,00	0,20 - 0,30	0,25 - 0.30	9,80 - 12,0

Gambar 3.2 menunjukkan skema proses pemotongan yang pertama hingga pemotongan yang terakhir. Pemotongan material dilakukan sepanjang 10 mm dengan jarak antar pemotongan sebesar 5 mm. Setelah semua proses pemotongan selesai dilakukan dan lebar pemotongan untuk masing-masing eksperimen telah

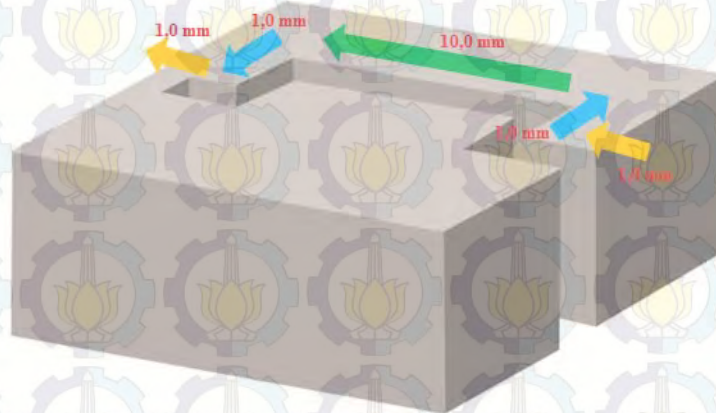




diukur, material dipotong dengan arah tegak lurus pemotongan awal pada jarak 5 mm dari ujung pemotongan awal. Ilustrasi arah dan dimensi pemotongan benda kerja dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.2 Skema proses pemotongan benda kerja



Gambar 3.3 Dimensi dan arah pemotongan benda kerja

## 2. Elektroda kawat

Elektroda kawat yang digunakan adalah AC CUT VS 900 *zinc coated brass wire* dengan diameter 0,25 mm. komposisi kimianya adalah Cu sebesar 65% dan Zn sebesar 35%. Kekuatan tarik adalah sebesar 880 N/sq.mm. Pemanjangan adalah sebesar 2%. Toleransi adalah  $\pm 0.001$  mm.





### 3.4.2 Peralatan Penelitian

#### 1. Mesin WEDM

Mesin WEDM yang digunakan pada penelitian ini adalah CHMER 32GF. Mesin tersebut memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Arah pergerakan	: lima sumbu (x, y, z, u, dan v)
Diameter kawat	: 0,15–0,30 mm
Kecepatan kawat maksimal	: 250 mm/detik
Dimensi meja kerja	: 600 mm x 400 mm



Gambar 3.4 Mesin WEDM CHMER 32GF

Sumber: Lab. CNC Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

#### 2. Peralatan ukur

Peralatan ukur yang digunakan selama penelitian ini diantaranya adalah:

##### a. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengukuran lapisan *recast* dan retak mikro pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan SEM tipe Inspect S50 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Alat ini digunakan untuk mengamati partikel dengan perbesaran sampai 150.000 kali dengan resolusi kedalaman 3-100 nanometer.





Gambar 3.5 *Scanning electron microscope* (SEM) Inspect S50

Sumber: Lab. Karakterisasi Material FTI-ITS

b. Alat uji kekerasan mikro

Pengukuran kekerasan mikro pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *Vickers microhardness tester* tipe Wilson Hardness 402MDV. Gambar 3.4 menunjukkan Alat ukur *Vickers microhardness tester* tipe Wilson Hardness 402MDV.



Gambar 3.6 *Vickers microhardness tester* tipe Wilson Hardness 402MDV

Sumber: Lab. Metalurgi Material Teknik Material FTI-ITS





c. Alat uji kekasaran permukaan

Pengukuran angka kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *surftest* 301 yang memiliki kecermatan sebesar 0,1  $\mu\text{m}$ . Gambar 3.5 menunjukkan Alat ukur Mitutoyo *surftest* 301.



Gambar 3.7 Mitutoyo *SurfTest* 301

Sumber: Lab. Manufaktur Teknik Mesin FTI-ITS

3. Peralatan bantu

Peralatan bantu yang digunakan selama penelitian ini adalah:

a. Gerinda dan kertas gosok

Alat ini digunakan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen uji serta membersihkan benda kerja dari kotoran yang bersifat isolator seperti cat, lilin, plastik, dan lain-lain.

b. Jangka sorong

Alat ini digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja, alat ini mempunyai kecermatan 0,05 mm.

c. Meja rata

Meja rata digunakan untuk meletakkan spesimen uji pada saat pengukuran kekasaran permukaan benda kerja.

### 3.5 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah percobaan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Menyiapkan spesimen yang meliputi: penyesuaian ukuran, perataan dan penghalusan permukaan, serta pembersihan spesimen dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu proses pemotongan.





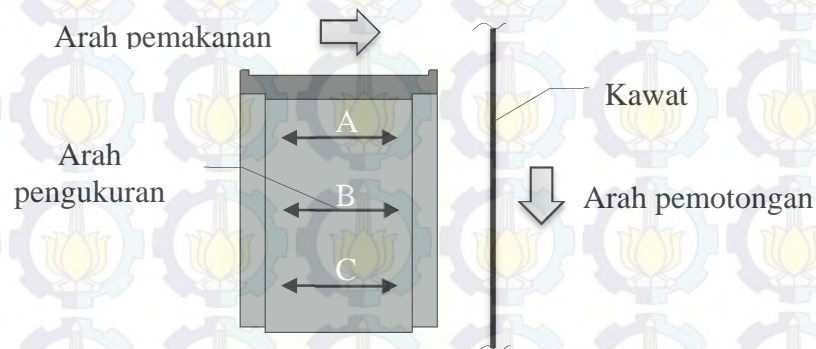
- b. Memasang spesimen pada jig yang tersedia pada mesin dan menjepit bagian spesimen yang tidak mengalami proses pemotongan, kemudian menentukan sumbu referensi pemesinan pada spesimen.
- c. Mengatur kawat elektroda berdiameter 0,25 mm pada jalur roll-roll yang tersedia pada mesin.
- d. Menghidupkan mesin WEDM dan menyetting faktor-faktor yang telah ditetapkan sesuai dengan rancangan eksperimen.
- e. Melaksanakan proses pemotongan berdasarkan pengaturan faktor yang telah ditentukan.
- f. Mencatat waktu aktual proses pengerjaan.
- g. Mengeluarkan dan mengeringkan benda kerja setelah proses pemotongan selesai.
- h. Mengukur kekasaran permukaan dengan menggunakan *surf test*.
- i. Mempersiapkan alat foto SEM.
- j. Menempatkan benda kerja hasil proses WEDM pada meja alat foto SEM.
- k. Mengamati dan mengambil gambar morfologi permukaan benda kerja dengan SEM.
- l. Mengukur kekerasan mikro menggunakan Vickers *microhardness tester*.
- m. Mengamati dan mengambil gambar mikro dari tiap kombinasi variabel proses.
- n. Lakukan analisis dari data yang sudah didapat.

### **3.6 Pengukuran dan Pengambilan Data**

#### **3.6.1 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan**

Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika ( $R_a$ ) yang dinyatakan dalam  $\mu\text{m}$ . Tabel 2.1 merekomendasikan panjang sampel pengukuran yang digunakan adalah 0,8 mm. Skema arah pemotongan oleh elektroda kawat tembaga dan arah serta posisi pengukuran kekasaran permukaan hasil pemotongan benda kerja ditunjukkan pada Gambar 3.7. Permukaan benda kerja hasil pemotongan diukur kekasaran permukaannya secara horizontal (pengukuran kekasaran permukaan tegak lurus dengan arah kawat pemotongan benda kerja).

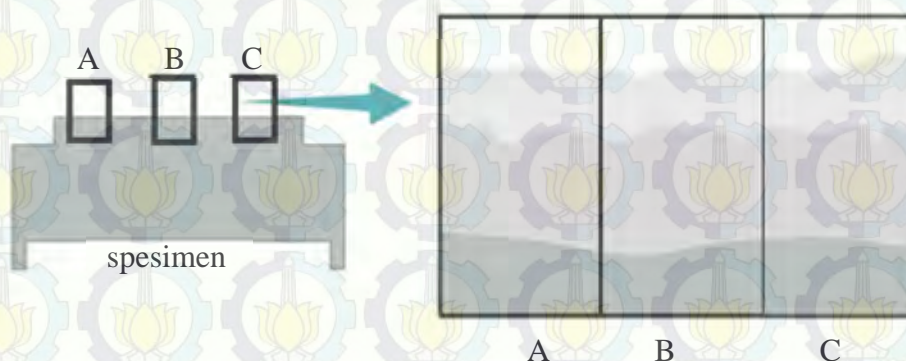




Gambar 3.8 Skema arah proses pemotongan dan arah pengukuran kekasaran permukaan pada benda kerja

### 3.6.2 Pengambilan Data Ketebalan *Lapisan Recast*

Pengambilan data ketebalan *lapisan recast* diawali dengan pengamatan melalui pencitraan gambar dengan menggunakan SEM, bagian yang akan diamati dihaluskan terlebih dahulu dengan menggunakan kertas gosok dengan grade yang cukup halus. Hal ini bertujuan agar saat melakukan proses SEM batas antara lapisan material induk dengan *lapisan recast* terlihat lebih jelas sehingga memudahkan dalam proses pengukuran. Pengukuran tebal *lapisan recast* dilakukan pada setiap foto dengan menggunakan bantuan perangkat lunak AutoCAD, dengan cara menarik garis ukur antara kedua tepi lapisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Pengukuran dilakukan di empat belas titik yang berbeda kemudian hasilnya di rata-rata.



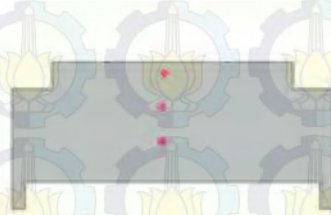
Gambar 3.9 Skema proses pengukuran tebal LR





### 3.6.3 Pengambilan Data Kekerasan Mikro

Pengambilan data kekerasan mikro dilakukan melalui pemberian pembebanan pada permukaan benda kerja yang telah mengalami proses permesinan. Pembebanan dilakukan sebanyak tiga titik pada permukaan benda kerja yang tidak mengalami proses permesinan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10. Pemilihan titik berdasarkan hasil pencitraan gambar dari SEM. Kemudian diambil nilai rata-rata dari tiga titik tersebut.



Gambar 3.10 Prosedur pengambilan data kekerasan mikro

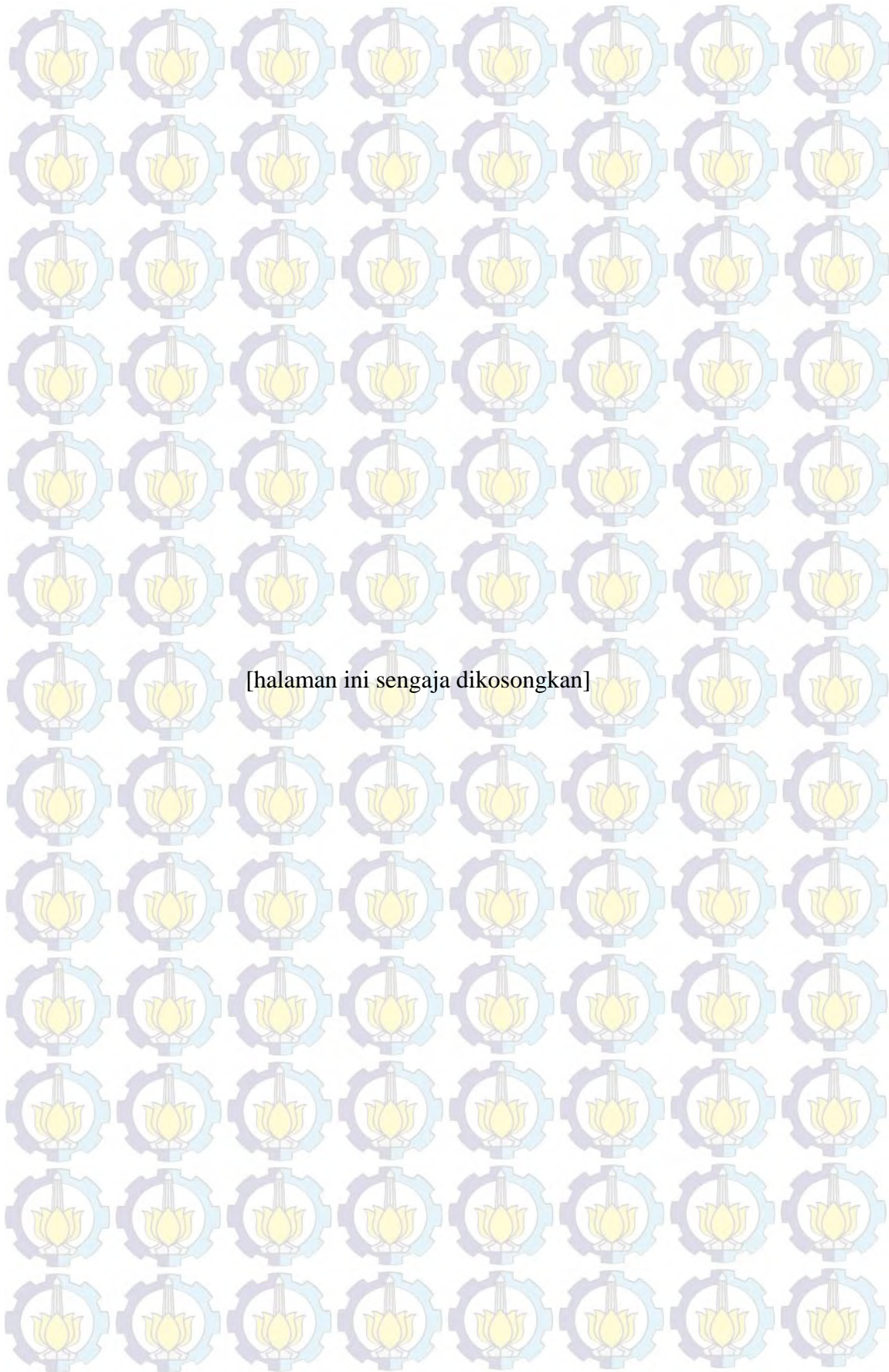
## 3.7 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan faktorial pada penelitian ini mencakup dua faktor, dimana masing-masing faktor terdiri dari tiga level yang biasa disebut faktorial 3 x 3. Rancangan percobaan ini juga melakukan 2 kali replikasi pada masing-masing respon. Tabel 3.2 merupakan tabel isian untuk percobaan yang dilaksanakan.

Tabel 3.2 : Isian rancangan percobaan

Variabel Proses		Variabel Respon					
ON	OV	KP		LR		KM	
		R1	R2	R1	R2	R1	R2
2 $\mu$ s	75 V						
	90 V						
	105 V						
4 $\mu$ s	75 V						
	90 V						
	105 V						
6 $\mu$ s	75 V						
	90 V						
	105 V						





[halaman ini sengaja dikosongkan]





## BAB 4

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengaruh Variabel *Pulse On Time* dan *Open Voltage* Terhadap Respon

##### Kekasaran permukaan

Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel *pulse on time* (ON) dan *open voltage* (OV) pada proses pemesinan WEDM. Kedua variabel proses tersebut diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. Pengambilan data untuk tiap kombinasi parameter proses pemesinan WEDM dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk memastikan keakuratan data. Tabel 4.1 menunjukkan data kekasaran permukaan yang diperoleh selama eksperimen.

Tabel 4.1 Data kekasaran permukaan hasil eksperimen

Kombinasi	Nilai kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ )			Rata-rata nilai kekasaran permukaan total ( $\mu\text{m}$ )
	Posisi A	Posisi B	Posisi C	
X <sub>111</sub>	1,33	1,35	1,31	1,33
X <sub>121</sub>	1,47	1,43	1,56	1,48
X <sub>131</sub>	1,65	1,63	1,67	1,65
X <sub>211</sub>	1,73	1,65	1,69	1,69
X <sub>221</sub>	1,91	1,83	1,89	1,87
X <sub>231</sub>	2,10	2,03	1,99	2,04
X <sub>311</sub>	2,01	2,2	2,04	2,08
X <sub>321</sub>	2,28	2,19	2,29	2,25
X <sub>331</sub>	2,5	2,49	2,31	2,43
X <sub>112</sub>	1,42	1,39	1,37	1,39
X <sub>122</sub>	1,42	1,67	1,65	1,58
X <sub>132</sub>	1,83	1,71	1,73	1,75
X <sub>212</sub>	1,77	1,80	1,78	1,78
X <sub>222</sub>	1,78	1,81	1,72	1,77
X <sub>232</sub>	2,18	2,04	2,20	2,14
X <sub>312</sub>	2,20	2,18	2,17	2,18
X <sub>322</sub>	2,12	2,16	2,19	2,15
X <sub>332</sub>	2,45	2,61	2,52	2,52

Sumber: Hasil perhitungan





Data dari hasil eksperimen diuji secara statistik untuk mengetahui variabel proses mana yang berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon. Analisis variansi (ANAVA) digunakan untuk mengetahui apakah ON dan OV memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. Tabel analisis variansi (ANAVA) untuk kekasaran permukaan yang disusun berdasarkan perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Analisis Variansi (ANAVA) Variabel Proses Pada Kekasaran

Permukaan

Source	DF	SS	MS	F	p - value
A	2	1,64431	1,64431	215,54	0,000
B	2	0,37788	0,37788	49,53	0,000
Error	13	0,04959	40		
Total	17				

Sumber: Hasil perhitungan

Nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dari  $F_{tabel}$  mengindikasikan bahwa faktor tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

1. Untuk faktor ON

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0.$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau_i \neq 0.$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 68,98 < F_{(0,05;2;13)} = 3,81$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh ON terhadap kekasaran permukaan.

2. Untuk faktor OV

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0.$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0.$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 14,62 < F_{(0,05;2;13)} = 3,81$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh OV terhadap kekasaran permukaan.

Berdasarkan uji hipotesis distribusi F, maka faktor ON dan OV memiliki pengaruh terhadap respon kekasaran permukaan. Kondisi  $H_0$  pada respon kekasaran permukaan untuk masing-masing faktor ditunjukkan oleh Tabel 4.3 sebagai berikut:





Tabel 4.3 Kondisi Hipotesis Nol Pada Respon Kekasaran Permukaan

Sumber variasi	Kondisi $H_0$
ON	Ditolak
OV	Ditolak

Sumber: Hasil perhitungan

*P-value* menunjukkan variabel proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Dalam penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk kekasaran permukaan yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 adalah sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses ON.

*P-value* = 0,000 <  $\alpha$  = 0,05, maka secara statistik variabel ON memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan.

2. Untuk variabel proses OV.

*P-value* = 0,000 <  $\alpha$  = 0,05, maka secara statistik variabel OV berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan.

Uji Tukey dilakukan untuk mengetahui level-level dari variabel ON dan OV yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan. Tabel 4.4 menunjukkan hasil uji Tukey pada ON, sedangkan Tabel 4.5 menunjukkan hasil uji Tukey pada OV. Rincian uji Tukey variabel proses terhadap kekasaran permukaan ditunjukkan pada Lampiran 5.

Tabel 4.4 Hasil Uji Tukey pada ON Untuk Respon Kekasaran Permukaan

ON ( $\mu$ s)	N	Mean	Grouping
6	6	2,3	A
4	6	1,9	B
2	6	1,5	C

Sumber: Hasil perhitungan





Tabel 4.5 Hasil Uji Tukey pada OV Untuk Respon Kekasaran Permukaan

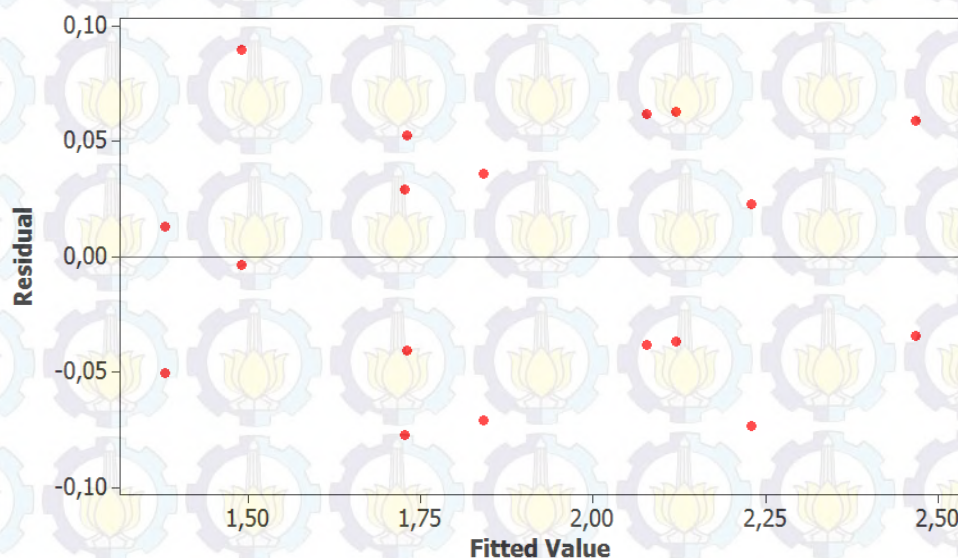
OV (V)	N	Mean	Grouping
105	6	2,1	A
90	6	1,9	B
75	6	1,7	C

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.4 menunjukkan kekasaran permukaan yang dihasilkan pada ketiga level ON berbeda. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa kekasaran permukaan yang dihasilkan berbeda pada ketiga level OV berbeda. Analisis Variansi mensyaratkan bahwa residual harus memenuhi tiga asumsi, yaitu bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan *mean* nol dengan variansi tertentu.

#### 4.1.1 Uji Identik

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa *residual* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



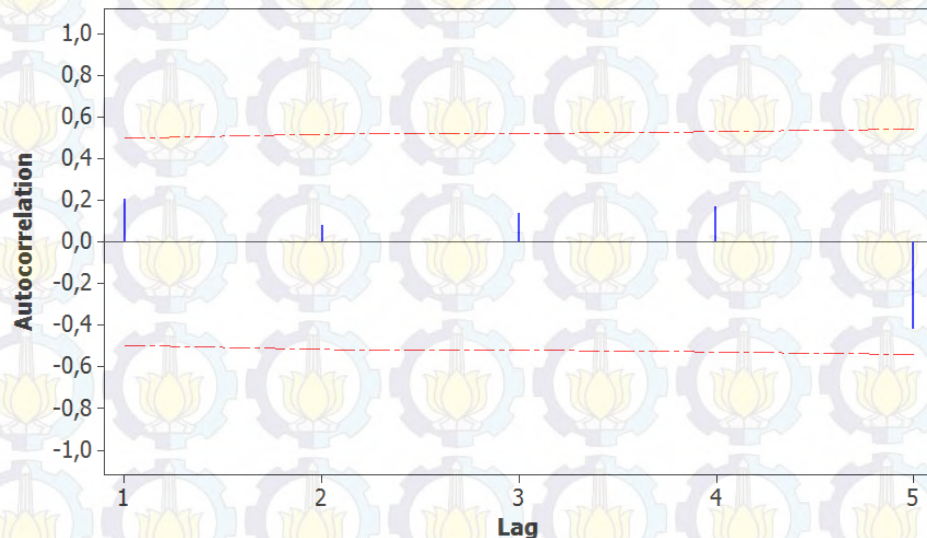
Gambar 4.1 Plot residual kekasaran permukaan *versus fitted values*





#### 4.1.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan *plot* ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, tidak ada nilai ACF pada tiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.2 Plot ACF pada respon kekasaran permukaan

#### 4.1.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : Residual berdistribusi normal

$H_1$  : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

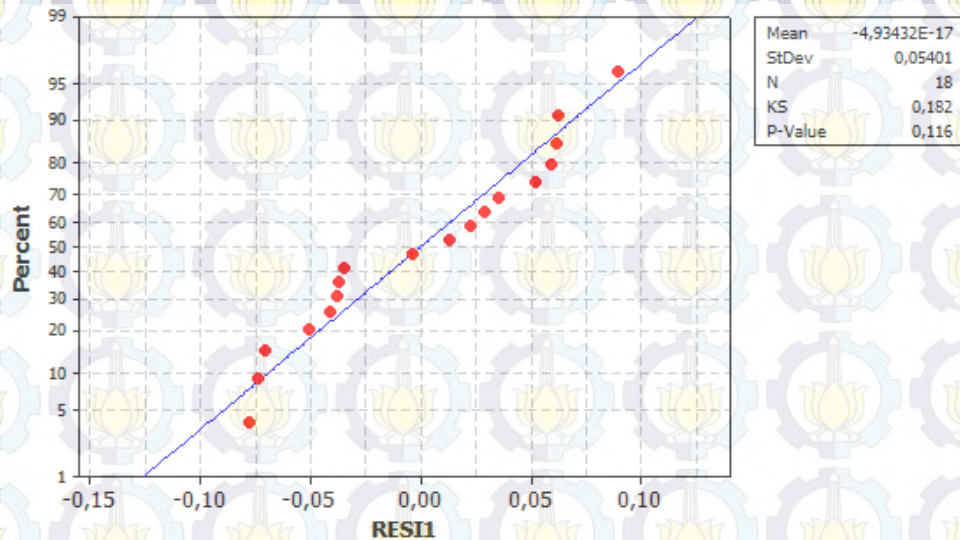
Gambar 4.7 menunjukan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- *p-value* 0,116 yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau *residual* berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $-4,9343 \times 10^{-17}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variasi di residual adalah sebesar  $(0,182)^2 = 0,03312$



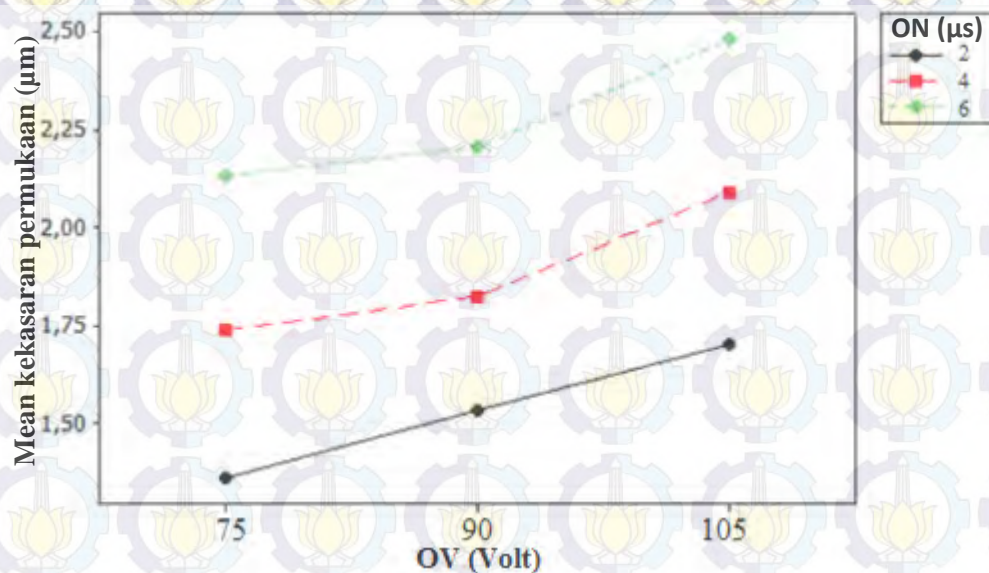


Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variasi tertentu (sebesar 0,03312) telah terpenuhi.



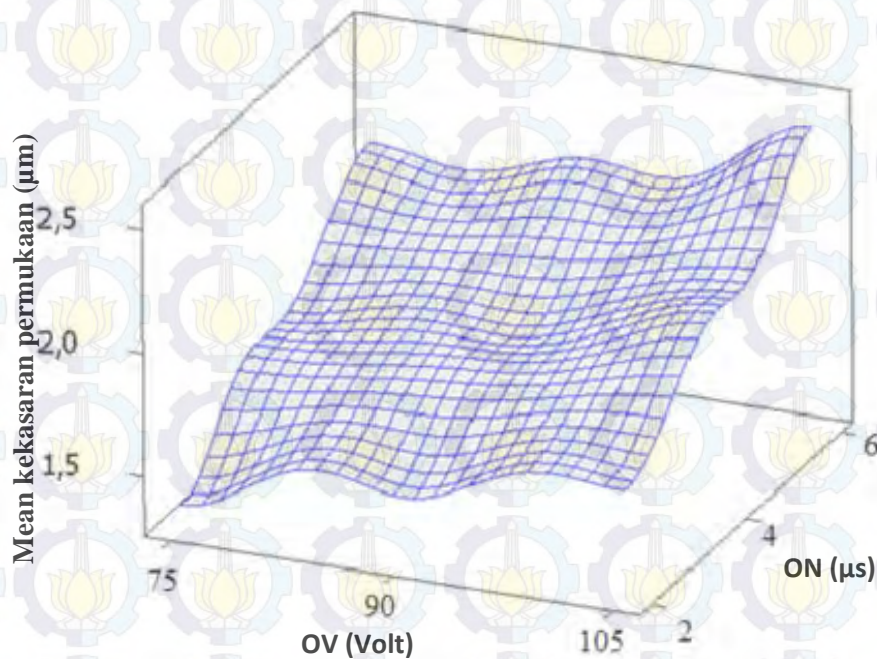
Gambar 4.3 Plot uji distribusi normal pada respon kekasaran permukaan

Secara grafik, hubungan antara faktor ON dan OV pada proses pemesinan WEDM terhadap respon kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4: Grafik pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon kekasaran permukaan.





Gambar 4.5: Grafik *surface plot* pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon nilai kekasaran permukaan.

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan bahwa peningkatan nilai faktor ON dan OV juga akan meningkatkan nilai kekasaran permukaan pada benda kerja hasil eksperimen. Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa secara umum kekasaran permukaan meningkat pesat ketika kedua faktor meningkat secara bersamaan. Nilai kekasaran permukaan terendah terjadi pada kombinasi ON sebesar 2  $\mu\text{s}$  dan OV sebesar 75 V. Nilai kekasaran permukaan yaitu sebesar 1,33  $\mu\text{m}$ . Nilai kekasaran permukaan tertinggi didapatkan dengan mengkombinasikan ON sebesar 6  $\mu\text{s}$  dan OV sebesar 105 V, yaitu sebesar 2,43  $\mu\text{m}$ . *Surface plot* pada Gambar 4.5 menunjukkan nilai kekasaran permukaan meningkat secara signifikan pada ON sebesar 6  $\mu\text{s}$ .

Parameter  $R_a$  banyak digunakan untuk mengidentifikasi permukaan. Hal ini disebabkan nilai  $R_a$  lebih sensitif terhadap perubahan yang terjadi pada proses pemesinan. Dengan demikian, jika ada tanda-tanda kenaikan kekasaran maka pencegahan dapat cepat dilakukan. Hasil analisis data eksperimen secara statistik menunjukkan bahwa  $R_a$  meningkat seiring dengan meningkatnya nilai ON. Selama proses pemesinan nilai ON yang tinggi akan menyebabkan kemungkinan terjadinya “double sparking” dan bunga api lokal yang lebih besar,





seperti yang disimpulkan oleh Hassan dkk. (2006). *Double sparkling* terjadi ketika nilai ON tinggi, sehingga menghasilkan frekuensi bunga api listrik yang lebih sering. Bunga api listrik tersebut mengikis benda kerja menumbuk benda kerja, dan dalam waktu yang singkat diikuti oleh bunga api listrik selanjutnya. Peningkatan ON maka energi panas yang disalurkan ke benda kerja juga semakin sering, sehingga menyebabkan terjadinya perpindahan panas dari permukaan terluar benda kerja menuju lapisan yang lebih dalam. Perpindahan panas tersebut membuat panas terkonduksi lebih dalam, sehingga benda kerja yang terkikis semakin banyak dan kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja juga akan semakin dalam. Hal ini akan mempengaruhi kekasaran permukaan pada benda kerja. Pada penelitian ini fenomena *double sparkling* terjadi melalui pengaturan variabel pemesinan ON sebesar 4  $\mu$ s dan 6  $\mu$ s, seperti yang ditunjukkan oleh grafik *surface plot* pada Gambar 4.5

Peningkatan OV mengakibatkan beda potensial yang terjadi antara benda kerja dan kawat elektroda juga semakin tinggi. Hal tersebut mengakibatkan medan listrik menjadi lebih kuat dan loncatan bunga api menjadi lebih stabil dan lebih efektif pada gap yang sama. Hal ini mengakibatkan jumlah material yang terkikis semakin banyak. Semakin besar nilai OV maka *discharge* yang dilepaskan semakin besar, sehingga energi panas yang terjadi juga semakin besar. Peningkatan jumlah material yang terkikis akan mempengaruhi nilai kekasaran permukaan pada benda kerja. Kekasaran permukaan akan semakin tinggi apabila selama proses pemesinan benda kerja tidak mengalami pembilasan (Hassan dkk., 2009).



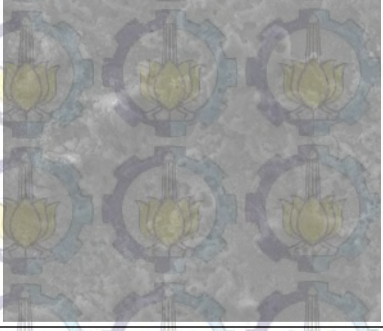
*Globule* merupakan bagian dari material yang meleleh (*molten metal*), yang terdapat secara acak pada permukaan benda kerja. *Globule* terbentuk karena adanya gas yang terlepas dari *redeposite material* dan terperangkap oleh material yang membeku dengan cepat (Hassan dkk., 2009). *Pockmark* terjadi karena material terori selama proses pemesinan, sehingga meninggalkan bekas cekungan pada permukaan benda kerja. Selama benda kerja terkikis terjadi pelepasan material, yang diikuti dengan pendinginan secara cepat melalui media cairan dielektrik. Hal ini akan menyebabkan terjadinya kawah pada permukaan benda kerja. Peningkatan dari energi panas yang disalurkan pada benda kerja juga akan





membuat kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja menjadi semakin dalam. *Debris* merupakan material yang terosi selama proses pemesinan, namun karena proses penyemprotan cairan dielektrik yang kurang baik puing-puing dari material tersebut tidak sampai terlepas dari benda kerja. Tabel 4.6 Menunjukkan topografi permukaan benda kerja yang diamati dengan menggunakan SEM dengan pembesaran 2000 kali.

Tabel 4.6 Topografi Permukaan Benda Kerja Hasil Pengamatan.

Kombi nasi	Gambar	Topografi			
		<i>Pockmark</i>	<i>Globule</i>	<i>Debris</i>	Kawah
ON 2 OV 1		Sedikit dan berdiameter kecil	Tidak ada	Tidak ada	Sedikit
ON 2 OV 4		Sedikit dan berdiameter kecil	Tidak ada	Tidak ada	Sedikit
ON 2 OV 7		Sedikit dan berdiameter besar	Sedikit	Tidak ada	Sedikit





Tabel 4.6 Lanjutan

Kombinasi	Gambar	Topografi			
		<i>Pockmark</i>	<i>Globule</i>	<i>Debris</i>	Kawah
ON 4 OV 1		Banyak dan berdiameter kecil	Sedikit	Ada	Menengah
ON 4 OV 4		Banyak dan berdiameter besar	Banyak	ada	menengah
ON 4 OV 7		Tersebar sebagian berdiameter kecil dan berdiameter besar	Banyak	Ada	Banyak
ON 6 OV 1		Tersebar dan berdiameter kecil	Banyak	Ada	Banyak





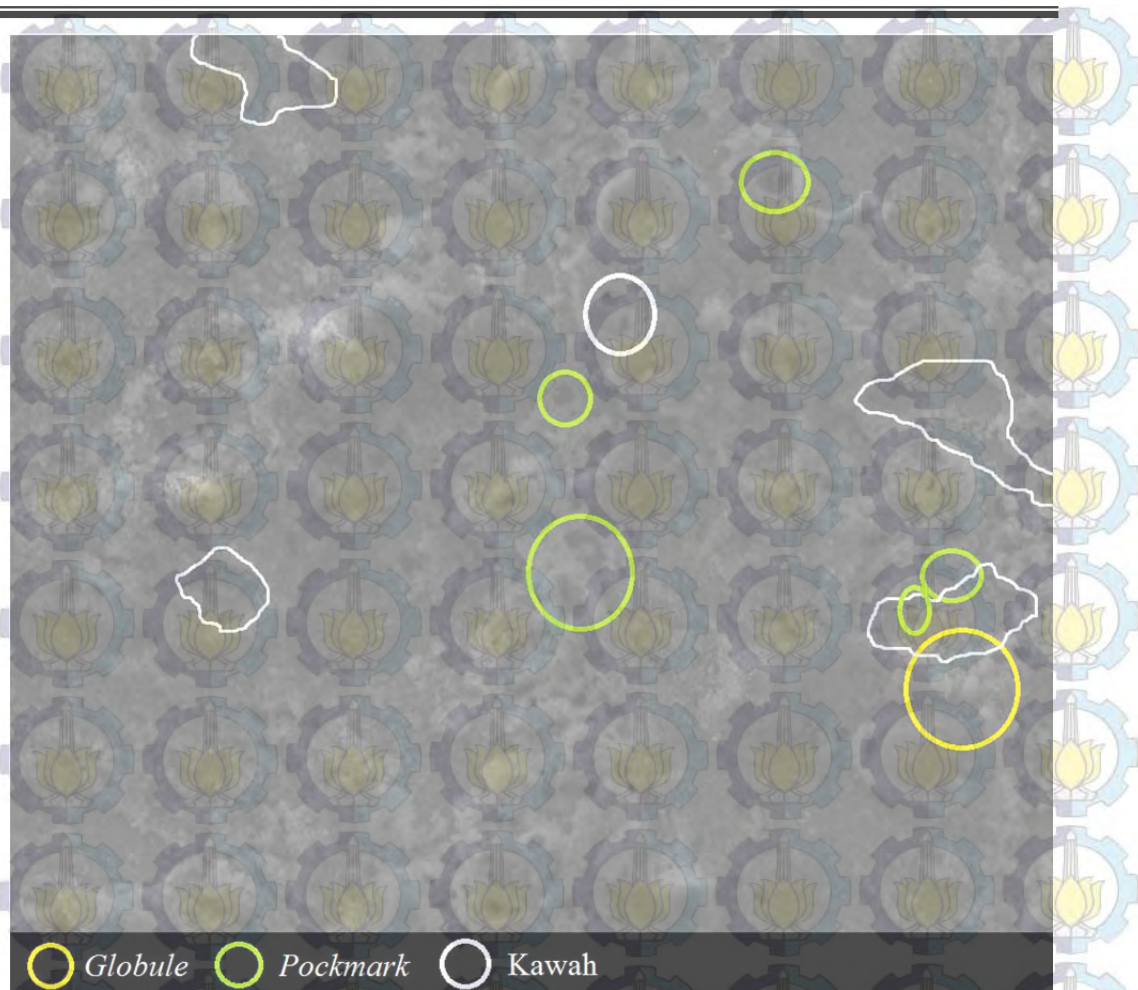
Tabel 4.6 Lanjutan

Kombinasi	Gambar	Topografi			
		<i>Pockmark</i>	<i>Globule</i>	<i>Debris</i>	Kawah
ON 6 OV 4		Tersebar dan berdiameter kecil	banyak	Ada	Banyak
ON 6 OV 7		Tersebar dan berdiameter besar	banyak	Ada	Banyak

Sumber: Hasil pengamatan

Gambar 4.6 menunjukkan topografi permukaan benda kerja pada kombinasi OV rendah dan ON tinggi, yang diamati dengan menggunakan SEM dengan perbesaran 2000 kali.

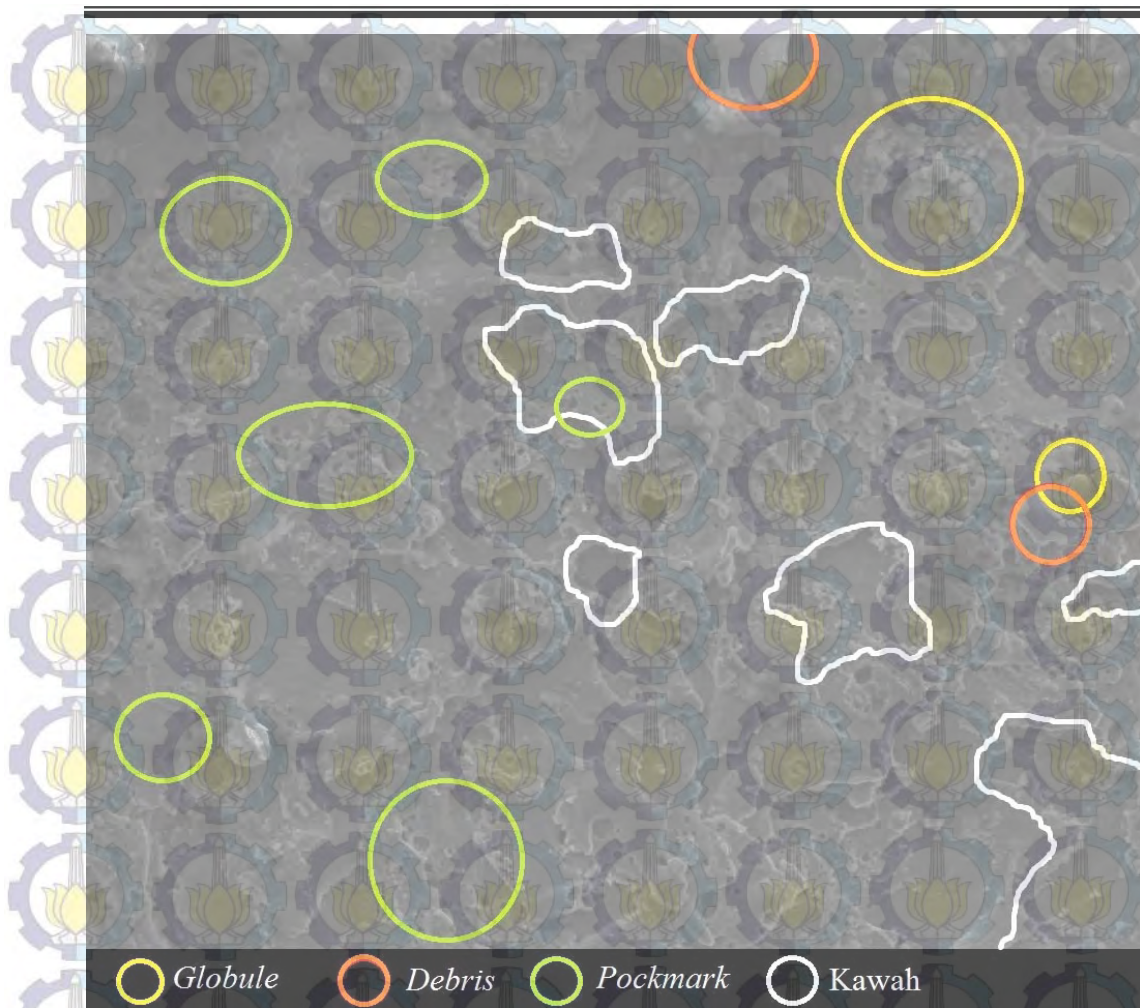




Gambar 4.6: Topografi permukaan benda kerja pada kombinasi ON rendah dan OV tinggi (ON = 2  $\mu$ s dan OV = 105 V)

Jumlah *pockmark* yang dihasilkan pada kombinasi ON yang rendah dan OV tinggi adalah sedikit, namun memiliki diameter besar. Energi *discharge* yang dilepaskan selama proses pemesinan, akan mengikis benda kerja. Semakin besar energi tersebut, maka diameter *pockmark* yang terdapat pada benda kerja juga semakin besar. Dari Gambar 4.6 juga dapat dilihat *globule* yang dihasilkan pada kombinasi ini adalah sedikit. Tidak ditemukan *debris* pada permukaan benda kerja hasil pemotongan dengan kombinasi ini.





Gambar 4.7: Topografi permukaan benda kerja pada kombinasi ON tinggi dan OV rendah (ON = 6  $\mu$ s dan OV = 75 V)

Gambar 4.7 menunjukkan topografi permukaan pada benda kerja dengan menggunakan kombinasi ON sebesar 6  $\mu$ s dan OV sebesar 1 V. Pengamatan pada Gambar 4.7 juga menunjukkan bahwa *pockmark* yang dihasilkan adalah banyak. Selain banyak *pockmark* tersebut juga tersebar merata pada permukaan benda kerja, namun berdiameter kecil. Jumlah *globule* yang dihasilkan adalah banyak dan terkonsentrasi pada area tertentu. Jumlah kawah yang terdapat pada permukaan benda kerja hasil pemotongan dengan kombinasi ini juga banyak. Pada permukaan benda kerja juga terdapat *debris*. Fenomena terjadinya *pockmark* yang banyak dan tersebar hampir diseluruh permukaan yang diamati, disebabkan oleh nilai ON yang cukup tinggi pada kombinasi ini. Sebagai akibatnya bunga api lebih sering menumbuk benda kerja sehingga benda kerja yang terkikis lebih banyak.





Semakin rendah nilai OV maka *discharge* yang terjadi semakin rendah. *Discharge* yang rendah mengakibatkan penetrasi yang terjadi pada logam menjadi kurang dalam, sehingga ukuran *pockmark* yang dihasilkan lebih kecil jika dibandingkan dengan *pockmark* yang dihasilkan pada kombinasi OV yang tinggi. Dari hal yang telah dijabarkan, dapat disimpulkan bahwa OV merupakan faktor yang mempengaruhi ukuran *pockmark*, sedangkan ON merupakan faktor yang mempengaruhi jumlah *pockmark*. Jumlah *globules*, *pockmark*, *debris* dan kawah akan mempengaruhi topografi permukaan benda kerja mengalami proses pemesinan.

#### **4.2 Pengaruh Variabel *Pulse On Time* dan *Open Voltage* Terhadap Respon Lapisan *Recast***

Lapisan *recast* merupakan bagian benda kerja (material induk) yang ikut meleleh kemudian membeku kembali dan membentuk lapisan baru pada permukaan benda kerja. Hal ini terjadi karena adanya panas yang diikuti pendinginan secara cepat pada benda kerja. lapisan *recast* terjadi pada permukaan benda kerja yang mengalami proses pemesinan. Ketebalan lapisan *recast* diamati dengan menggunakan SEM dengan pembesaran 2.000 kali. Pada penelitian ini pengambilan gambar lapisan *recast* diambil sebanyak 3 kali untuk tiap kombinasi, yaitu pada sisi kanan, tengah dan kiri pada benda kerja. Hal ini dilakukan untuk memastikan keakuratan data pada penelitian ini. Setelah didapatkan gambar dari lapisan *recast*, langkah selanjutnya adalah melakukan pengukuran ketebalan lapisan *recast* pada setiap foto dari benda kerja dengan menggunakan perangkat lunak AutoCAD. Setiap gambar hasil SEM, dilakukan pengukuran ketebalan lapisan *recast* sebanyak 10 titik, kemudian menghitung rata-rata dari ketebalan lapisan *recast* untuk tiap gambar hasil SEM. Setelah itu data ketebalan lapisan *recast* diuji secara statistik. Langkah terakhir adalah mengamati fenomena yang terjadi berdasarkan data dan gambar hasil SEM. Data lapisan *recast* yang diperoleh dari hasil eksperimen ditunjukkan oleh Tabel 4.7.





Tabel 4.7 Data Lapisan *Recast* Hasil Eksperimen

Kombinasi	Ketebalan lapisan <i>recast</i> ( $\mu\text{m}$ )			Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> total ( $\mu\text{m}$ )
	Posisi A	Posisi B	Posisi C	
X <sub>111</sub>	4,22	4,42	4,95	4,53
X <sub>121</sub>	4,99	4,67	4,66	4,77
X <sub>131</sub>	5,14	4,88	5,11	5,04
X <sub>211</sub>	4,37	4,93	6,54	5,28
X <sub>221</sub>	4,02	4,65	7,64	5,44
X <sub>231</sub>	5,23	6,00	5,39	5,54
X <sub>311</sub>	5,40	5,54	5,90	5,62
X <sub>321</sub>	5,97	5,25	6,26	5,83
X <sub>331</sub>	6,07	5,73	6,61	6,14
X <sub>112</sub>	4,44	4,23	4,48	4,38
X <sub>122</sub>	4,71	4,72	4,22	4,55
X <sub>132</sub>	5,15	5,00	5,13	5,09
X <sub>212</sub>	4,72	5,77	4,80	5,10
X <sub>222</sub>	5,54	5,54	4,91	5,33
X <sub>232</sub>	5,44	5,53	5,34	5,44
X <sub>312</sub>	5,76	5,69	5,45	5,63
X <sub>322</sub>	7,02	4,42	5,97	5,80
X <sub>332</sub>	5,89	6,26	6,31	6,16

Sumber: Hasil perhitungan

Data hasil eksperimen diuji secara statistik untuk mengetahui variabel proses mana yang berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon. Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui apakah variabel ON dan OV memiliki pengaruh yang signifikan terhadap lapisan *recast*. Tabel analisis variansi (ANOVA) untuk lapisan *recast* yang disusun berdasarkan perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.8

Tabel 4.8 Analisis Variansi (ANOVA) Variabel Proses Pada Lapisan *Recast*

Source	DF	SS	MS	F	$p$ - value
A	2	3,8612	1,9306	191,48	0,000
B	2	0,6934	0,3467	34,38	0,000
Error	9	0,1311			
Total	17	4,6857			

Sumber: Hasil perhitungan





Nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dari  $F_{tabel}$  mengindikasikan bahwa faktor tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap lapisan *recast*. Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

1. Untuk faktor ON

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0.$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau_i \neq 0.$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 327,42 < F_{(0,05;2;13)} = 3,81$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh ON terhadap ketebalan lapisan *recast*.

2. Untuk faktor OV

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0.$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0.$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 59,42 < F_{(0,05;2;13)} = 3,81$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh OV terhadap ketebalan lapisan *recast*.

Berdasarkan uji hipotesis distribusi F, dapat diketahui bahwa faktor ON dan OV memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon lapisan *recast*. Kondisi  $H_0$  untuk masing-masing faktor ditunjukkan oleh Tabel 4.9 sebagai berikut:

Tabel 4.9 Kondisi Hipotesis Nol Pada Respon Lapisan *Recast*

Sumber variasi	Kondisi $H_0$
ON	Ditolak
OV	Ditolak

Sumber: Hasil perhitungan

*P-value* menunjukkan variabel proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap ketebalan lapisan *recast*. *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Dalam penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk ketebalan lapisan *recast* adalah sebagai berikut:





1. Untuk variabel proses ON.

$P\text{-value} = 0,000 < \alpha = 0,05$ , maka ada pengaruh variabel ON terhadap ketebalan lapisan *recast*.

2. Untuk variabel proses OV.

$P\text{-value} = 0,000 > \alpha = 0,05$ , maka ada pengaruh variabel proses kecepatan makan ketebalan lapisan *recast*.

Untuk mengetahui level dari ON dan OV yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap ketebalan lapisan *recast*, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 menunjukkan hasil uji Tukey pada ON dan OV. Rincian uji Tukey variabel proses terhadap ketebalan lapisan *recast* ditunjukkan pada Lampiran 6.B.

Tabel 4.10 Hasil Uji Tukey pada ON Terhadap Respon Lapisan *Recast*

ON ( $\mu\text{s}$ )	N	Mean	Grouping
6	6	5,9	A
4	6	5,4	B
2	6	4,7	C

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.11 Hasil Uji Tukey pada OV Terhadap Respon Lapisan *Recast*

OV (V)	N	Mean	Grouping
105	6	5,6	A
90	6	5,3	B
75	6	5,1	C

Sumber: Hasil perhitungan

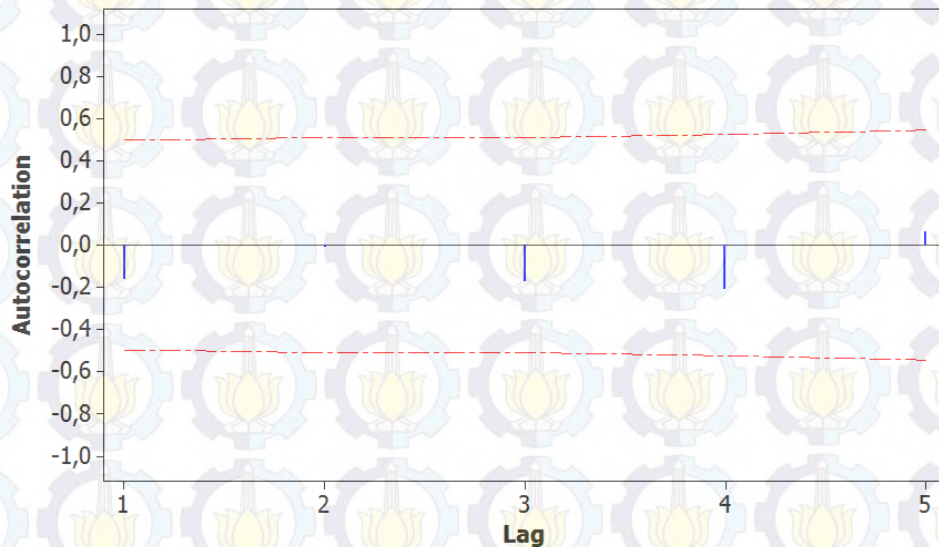
Hasil uji Tukey pada Tabel 4.10 menunjukkan kekasaran permukaan yang dihasilkan pada ketiga level ON berbeda. Tabel 4.11 menunjukkan bahwa lapisan *recast* yang dihasilkan berbeda pada ketiga level OV berbeda. Analisis Variansi mensyaratkan bahwa residual harus memenuhi tiga asumsi, yaitu bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan *mean* nol dengan variansi tertentu.





#### 4.2.1 Uji Independen

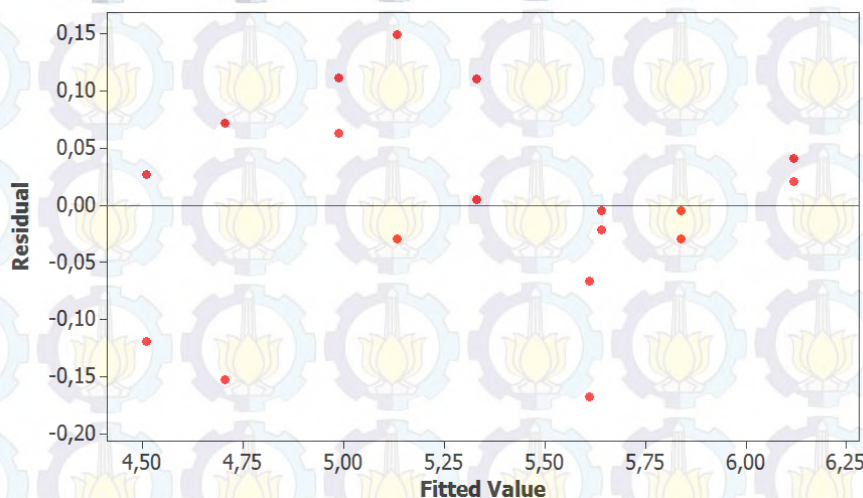
Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan *plot* ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, tidak ada nilai ACF pada tiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.8 Plot ACF pada respon lapisan *recast*

#### 4.2.2 Uji Identik

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa *residual* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.9 Plot residual lapisan respon *recast* versus *fitted values*





#### 4.2.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : Residual berdistribusi normal

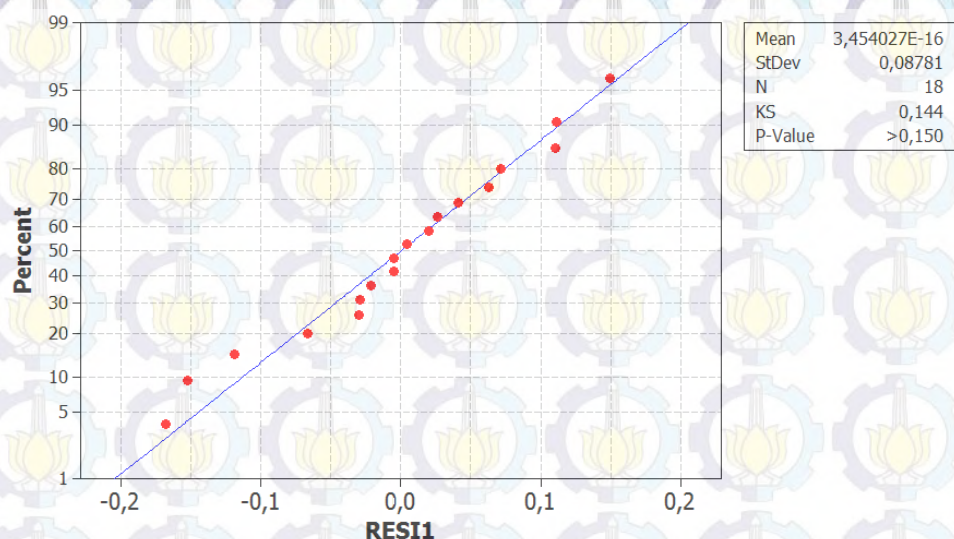
$H_1$  : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika  $p$ -value lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- $p$ -value  $> 0,150$  yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau *residual* berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $3,4540 \times 10^{-16}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variasi di residual adalah sebesar  $(0,144)^2 = 0,02073$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variasi tertentu (sebesar 0,02073) telah terpenuhi.

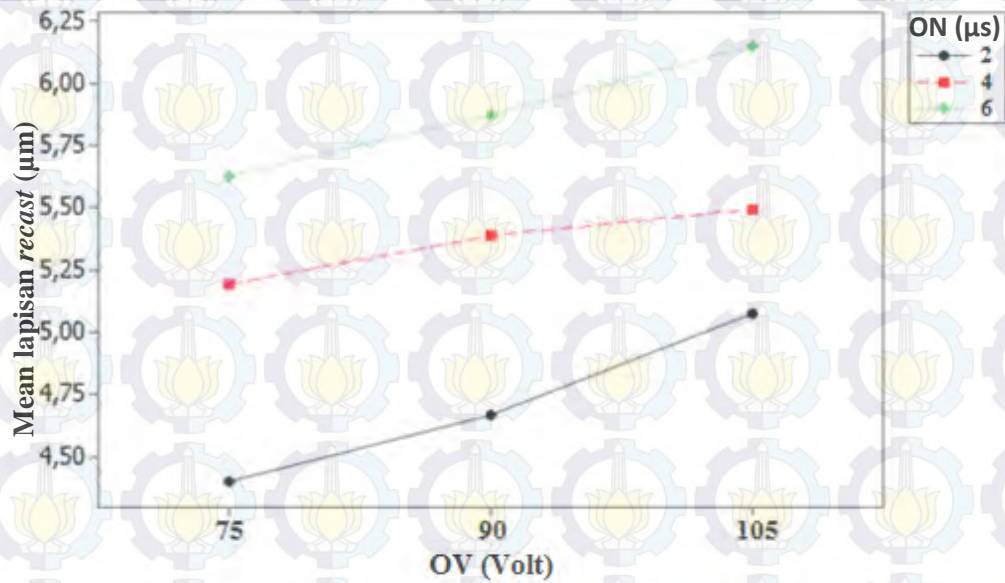


Gambar 4.10 Plot uji distribusi normal pada respon lapisan *recast*

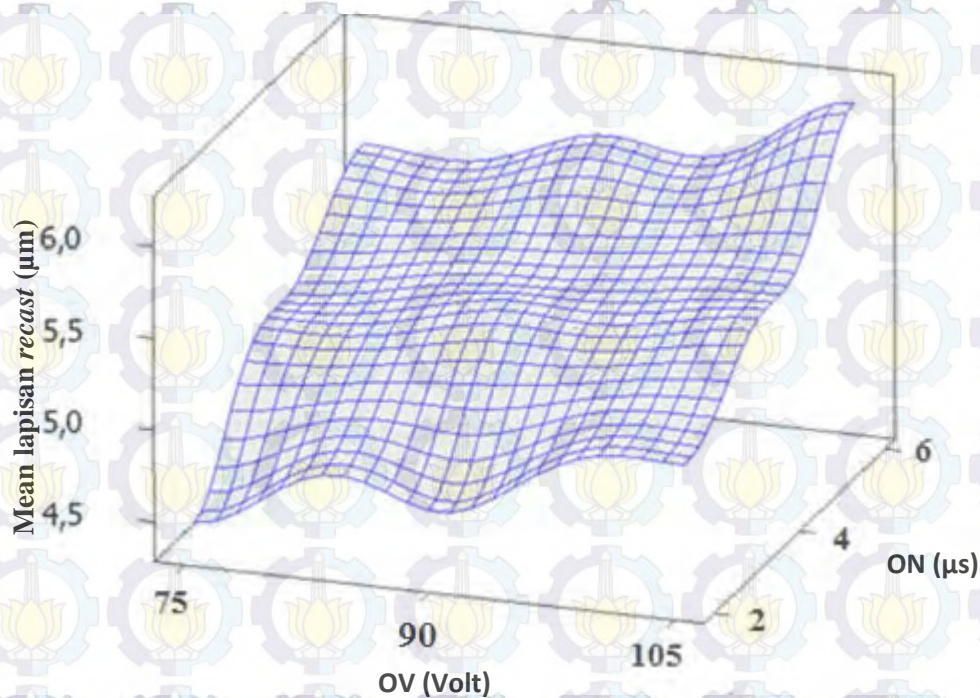




Secara grafik, hubungan antara faktor ON dan OV pada proses pemesinan WEDM terhadap respon ketebalan lapisan *recast* ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.11: Grafik pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon ketebalan lapisan *recast*.



Gambar 4.12 Grafik surface plot pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon ketebalan lapisan *recast*.





Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukkan bahwa semakin besar nilai faktor ON dan OV diikuti dengan bertambahnya ketebalan lapisan *recast* pada benda kerja hasil eksperimen. Dari Gambar 4.11 dan 4.12 dapat dilihat bahwa secara umum ketebalan lapisan *recast* meningkat pesat ketika kedua faktor meningkat secara bersamaan. Peningkatan ketebalan lapisan *recast* secara drastis dapat dilihat pada kombinasi ON sebesar 4  $\mu\text{s}$  dan 6  $\mu\text{s}$  serta OV sebesar 90 V dan 105 V. Lapisan *recast* paling tebal didapatkan pada kombinasi ON 6 dan OV 105 V yaitu sebesar 6,150  $\mu\text{m}$ . Hal ini seperti yang disimpulkan oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Newton dkk. (2008). Bahwa peningkatan ON akan diikuti semakin tebalnya lapisan *recast*. Tabel 4.12 menunjukkan bentuk lapisan *recast* yang didapat dalam penelitian ini.





Tabel 4.12: Bentuk Lapisan *Recast* yang Didapat Selama Penelitian

kombi nasi		kombi nasi	
ON 2 OV 1		ON 2 OV 4	
Fenom ena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk memiliki kecenderungan datar, dan ketebalan lapisan <i>recast</i> seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 4,53 $\mu\text{m}$ .	Feno mena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk hampir sama dengan kombinasi ON 2 dan OV 1, lapisan <i>recast</i> lebih tebal, adalah sebesar 4,99 $\mu\text{m}$ .
ON 2 OV 7		ON 4 OV 1	
Fenom ena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk memiliki kecenderungan datar, ketebalan lapisan <i>recast</i> seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 5,12 $\mu\text{m}$ .	Feno mena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk cenderung berkontur, ketebalan lapisan <i>recast</i> tidak seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 4,99 $\mu\text{m}$ .





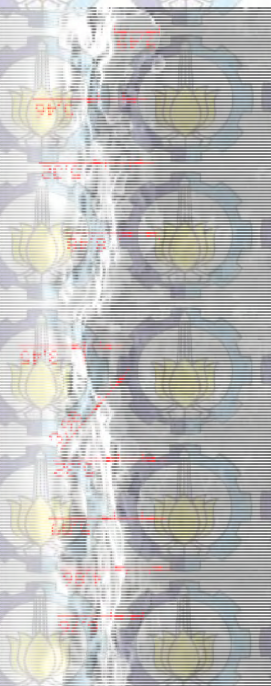
Tabel 4.12: Lanjutan

kombi nasi	Gambar	kombi nasi	Gambar
ON 4		ON 4	
OV 4		OV 7	
Fenom ena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk memiliki kecenderungan datar, ketebalan lapisan <i>recast</i> seragam.	Feno mena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk cenderung berkontur, sehingga ketebalan lapisan <i>recast</i> tidak seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 5,39 $\mu\text{m}$
ON 6		ON 7	
OV 1		OV 4	
Fenom ena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk cenderung berkontur, ketebalan lapisan <i>recast</i> tidak seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 5,90 $\mu\text{m}$ .	Feno mena	Lapisan <i>recast</i> yang terbentuk cenderung berkontur, ketebalan lapisan <i>recast</i> tidak seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 5,28 $\mu\text{m}$





Tabel 4.12 Lanjutan

kombinasi	Gambar
ON'6 OV'7	
Fenomena	<p>lapisan <i>recast</i> yang terbentuk cenderung berkontur, ketebalan lapisan <i>recast</i> tidak seragam. Rata-rata ketebalan lapisan <i>recast</i> sebesar 5,89 <math>\mu\text{m}</math></p>

Sumber: Hasil Pengamatan





Pada proses pemesinan WEDM, tidak selalu terjadi pemotongan. Pemotongan terjadi ketika memasuki fase ON, sedangkan ketika memasuki fase OFF tidak terjadi pemotongan (Ghodsiyeh dkk., 2013). Hal ini terjadi dalam hitungan mikrosekon, dan terjadi secara berulang-ulang, serta diikuti pendinginan cepat melalui cairan dielektrik. Pembilasan dengan cairan dielektrik mengakibatkan material yang terkikis terlepas dari benda kerja. Proses pemotongan pada WEDM terjadi melalui pengikisan material. Faktor ON mengatur frekuensi dari fase pemotongan tersebut, sedangkan faktor OV mengatur besarnya energi pemotongan tersebut.

Peningkatan faktor ON menyebabkan frekuensi tumbukan bunga api pada benda kerja akan semakin tinggi, sehingga material yang meleleh dan membeku akan semakin banyak. Peningkatan OV akan menyebabkan energi panas yang disalurkan pada benda kerja akan semakin besar, sehingga panas yang terkonduksi pada benda kerja akan semakin jauh dari permukaan benda kerja. Peningkatan nilai ON dan OV maka material benda kerja yang terkikis semakin banyak.

Pada penelitian ini beberapa lapisan *recast* memiliki kecenderungan berkontur. Tabel 4.12 menunjukkan bahwa terdapat beberapa permukaan lapisan *recast* yang memiliki kecenderungan berkontur, namun terdapat juga beberapa yang memiliki lapisan *recast* cenderung datar. Pada faktor ON kecil dan OV besar, lapisan *recast* yang terbentuk cenderung datar. Hal ini terjadi karena frekuensi bunga api yang mengikis benda kerja rendah, sehingga benda kerja yang terkikis lebih sedikit. Hal tersebut mengakibatkan kontur pada lapisan *recast* memiliki kecenderungan datar. Pada faktor ON yang tinggi dan OV yang rendah bentuk lapisan *recast* memiliki kecenderungan berkontur. ON mengikis benda kerja dalam bentuk energi panas. Peningkatan ON maka bunga api yang mengikis benda kerja juga semakin sering, sehingga mengakibatkan material yang terkikis semakin banyak. Hal ini mengakibatkan perbedaan kontur pada lapisan *recast*. OV yang tinggi menyebabkan panas yang terkonduksi lebih dalam sehingga benda kerja yang terkikis lebih dalam, sehingga material yang meleleh dan membeku semakin banyak. Hal ini akan menyebabkan retang perbedaan kontur makin tinggi. Pada pengaturan ON dan OV yang tinggi keberadaan kontur juga akan semakin terlihat.





#### 4.3 Pengaruh Variabel *Pulse On Time* dan *Open Voltage* Terhadap Respon Kekerasan Mikro

Selama proses pemesinan terjadi pemanasan dan pendinginan dengan cepat melalui media cairan dielektrik. Hal ini mengakibatkan benda kerja mengalami perubahan secara metalurgi. Perbedaan nilai kekerasan antara lapisan *recast* dan material induk diakibatkan oleh adanya pelelehan dan pembekuan dengan cepat pada benda kerja yang mengalami proses pemesinan. Pengambilan data kekerasan mikro diukur dengan menggunakan alat ukur Vickers *microhardness tester*. Penentuan titik pembebanan dilakukan berdasarkan pada hasil pencitraan gambar dengan menggunakan SEM. Dalam penelitian ini dilakukan pengukuran nilai kekerasan mikro didapatkan dengan cara mengukur diagonal jejak *indentor* pada benda kerja. Setelah didapat panjang diagonal *indentor*, nilai kekerasan mikro dihitung menggunakan persamaan 2.6. Kedalaman indentasi menunjukkan seberapa kuat benda kerja menahan laju indentor. Kedalaman indentasi dihitung menggunakan persamaan 2.7 dan 2.8. Bentuk jejak *indentor* pada benda kerja ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13: Bentuk jejak *indentor* pada benda kerja

Pada penelitian ini pembebanan yang diberikan adalah sebesar 0,3 kg. Setelah didapat nilai kekerasan pada lapisan *recast*, maka dilakukan analisis terhadap fenomena yang terjadi berdasarkan pada data tersebut. Tabel 4.13 menunjukkan data kekerasan mikro hasil percobaan.





Tabel 4.13 Data Kekerasan Mikro Hasil Eksperimen

Kombinasi	diagonal <i>indentor</i> ( $\mu\text{m}$ )		kekerasan mikro (VHN)	Kedalaman indentasi ( $\mu\text{m}$ )
	1	2		
X <sub>111</sub>	28,22	28,22	698,42	7,83
X <sub>121</sub>	28,86	28,76	670,11	8,00
X <sub>131</sub>	29,41	29,23	647,00	8,14
X <sub>211</sub>	29,18	29,02	656,82	8,08
X <sub>221</sub>	29,32	29,40	645,24	8,15
X <sub>231</sub>	29,66	29,60	633,53	8,23
X <sub>311</sub>	29,84	29,34	635,24	8,22
X <sub>321</sub>	29,71	29,51	634,39	8,22
X <sub>331</sub>	29,93	30,22	614,92	8,35
X <sub>112</sub>	28,62	28,55	680,70	7,93
X <sub>122</sub>	28,88	28,80	668,71	8,01
X <sub>132</sub>	29,21	29,35	648,77	8,13
X <sub>212</sub>	29,20	29,20	652,33	8,11
X <sub>222</sub>	29,30	29,25	648,99	8,13
X <sub>232</sub>	29,11	29,85	639,99	8,18
X <sub>312</sub>	29,66	29,66	632,25	8,24
X <sub>322</sub>	30,35	29,64	618,21	8,33
X <sub>332</sub>	30,17	30,27	609,03	8,39

Sumber: hasil perhitungan

Data hasil eksperimen kemudian diuji secara statistik untuk mengetahui variabel proses mana yang berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon. Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui ON dan OV yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap kekerasan mikro. Tabel analisis variansi (ANOVA) untuk lapisan *recast* yang disusun berdasarkan perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Analisis Variansi (ANOVA) Variabel Proses Pada Kekerasan Mikro

Source	DF	SS	MS	F	$\rho$ - value
A	2	32501	16251	409,90	0,000
B	2	7602	3801	95,87	0,000
Error	13	515	40		
Total	17	40618			

Sumber: Hasil perhitungan

Nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dari  $F_{tabel}$  mengindikasikan bahwa faktor tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon kekerasan





permukaan. Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

1. Untuk faktor ON

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_k = 0.$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau_i \neq 0.$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 77,85 < F_{(0,05;2;13)} = 3,81$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh ON terhadap nilai kekerasan mikro.

2. Untuk faktor OV

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0.$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta_j \neq 0.$$

Kesimpulan:  $F_{hitung} = 28,45 < F_{(0,05;2;13)} = 3,81$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya ada pengaruh OV terhadap nilai kekerasan mikro. Berdasarkan uji hipotesis distribusi F, maka faktor ON dan OV memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon kekerasan mikro. Kondisi  $H_0$  untuk masing-masing faktor ditunjukkan oleh Tabel 4.15 sebagai berikut:

Tabel 4.15 Kondisi Hipotesis Nol Pada Respon Kekerasan Mikro

Sumber variasi	Kondisi $H_0$
ON	Ditolak
OV	Ditolak

Sumber: Hasil perhitungan

*P-value* menunjukkan variabel proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap ketebalan lapisan *recast*. *P-value* yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa variabel proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Dalam penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan *p-value* untuk nilai kekerasan mikro adalah sebagai berikut:

1. Untuk variabel proses ON.

$P\text{-value} = 0,000 < \alpha = 0,05$ , maka ada pengaruh variabel ON terhadap ketebalan lapisan *recast*.

2. Untuk variabel proses OV.

$P\text{-value} = 0 > \alpha = 0,05$ , maka ada pengaruh variabel proses kecepatan makan ketebalan kekerasan mikro.





*P-value* pada Tabel 4.13 menunjukkan faktor ON dan OV berbading lurus terhadap respon nilai kekerasan mikro. Untuk mengetahui level dari ON dan OV yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap nilai kekerasan mikro, maka dilakukan uji Tukey. Tabel 4.16 dan Tabel 4.17 menunjukkan hasil uji Tukey pada variabel ON dan OV. Rincian uji Tukey variabel ON dan OV terhadap nilai kekerasan mikro ditunjukkan pada Lampiran 7.

Tabel 4.16 Hasil Uji Tukey Pada ON Terhadap Respon Kekerasan Mikro

ON ( $\mu$ s)	N	Mean	Grouping
6	6	640,0	A B C
4	6	593,7	
2	6	536,8	

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.17 Hasil Uji Tukey pada OV Terhadap Respon Kekerasan Mikro

OV (V)	N	Mean	Grouping
105	6	610,0	A B C
90	6	599,1	
75	6	562,0	

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.16 menunjukkan kekasaran permukaan yang dihasilkan pada ketiga level ON berbeda. Tabel 4.7 menunjukkan bahwa kekerasan mikro yang dihasilkan berbeda pada ketiga level OV berbeda. Analisis Variansi mensyaratkan bahwa residual harus memenuhi tiga asumsi, yaitu bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan *mean* nol dengan variansi tertentu.

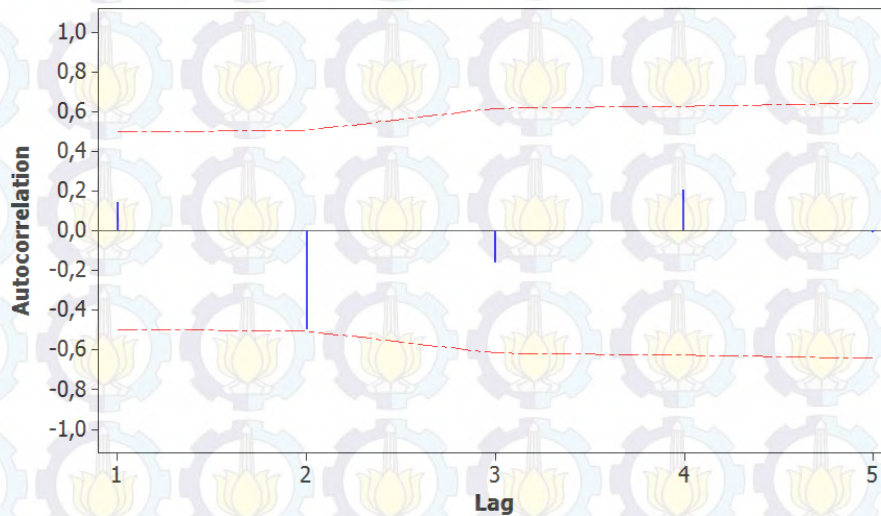
#### 4.3.1 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan *plot* ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, tidak ada nilai ACF pada tiap *lag* yang





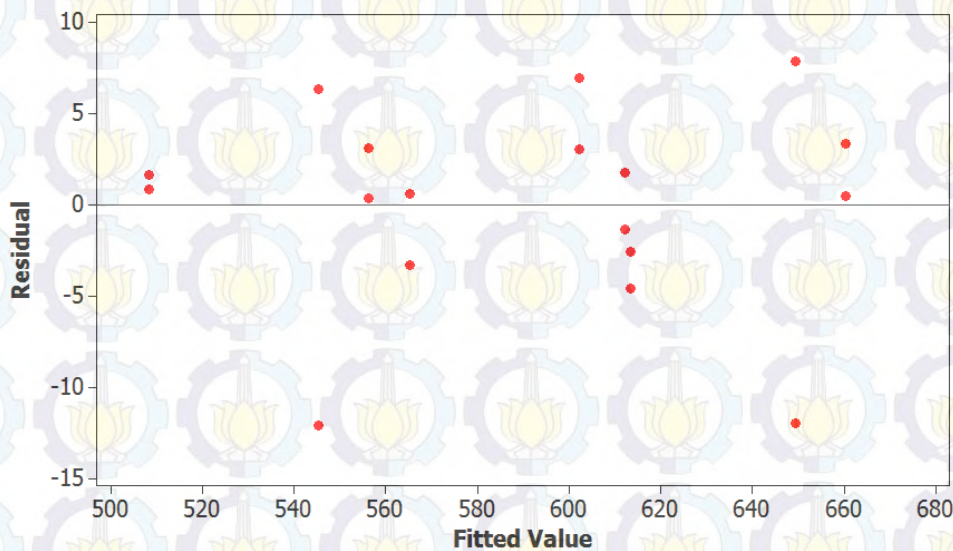
keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar residual artinya residual bersifat independen.



Gambar 4.14 Plot ACF pada respon kekerasan mikro

#### 4.3.2 Uji Identik

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa *residual* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi residual identik terpenuhi.



Gambar 4.15 Plot residual respon kekerasan mikro *versus fitted values*





#### 4.3.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

$H_0$  : Residual berdistribusi normal

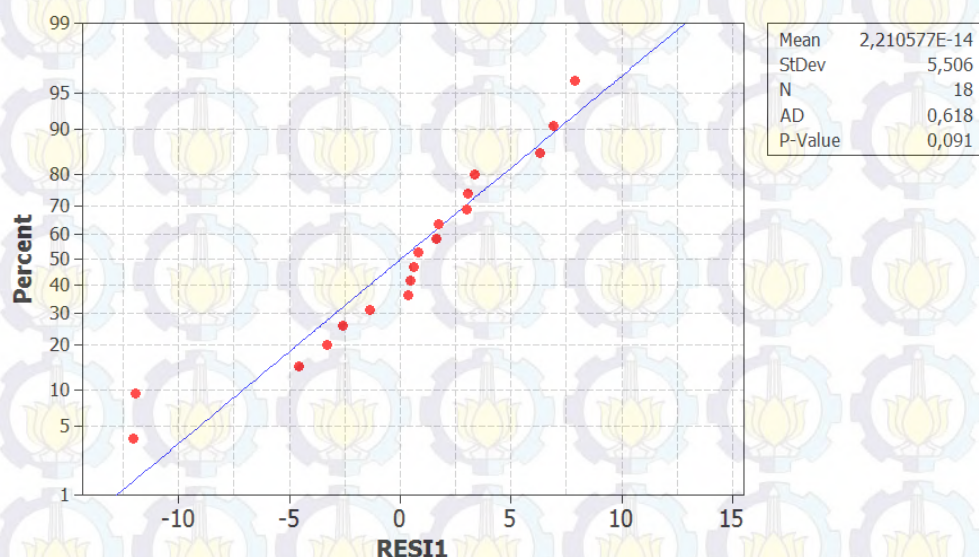
$H_1$  : Residual tidak berdistribusi normal

$H_0$  ditolak jika  $p$ -value lebih kecil dari pada  $\alpha = 0,05$ .

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

- $p$ -value 0,091 yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau *residual* berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $2,2105 \times 10^{-14}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variasi di residual adalah sebesar  $(0,618)^2 = 0,3819$

Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai *mean* sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variasi tertentu (sebesar 0,3819) telah terpenuhi.

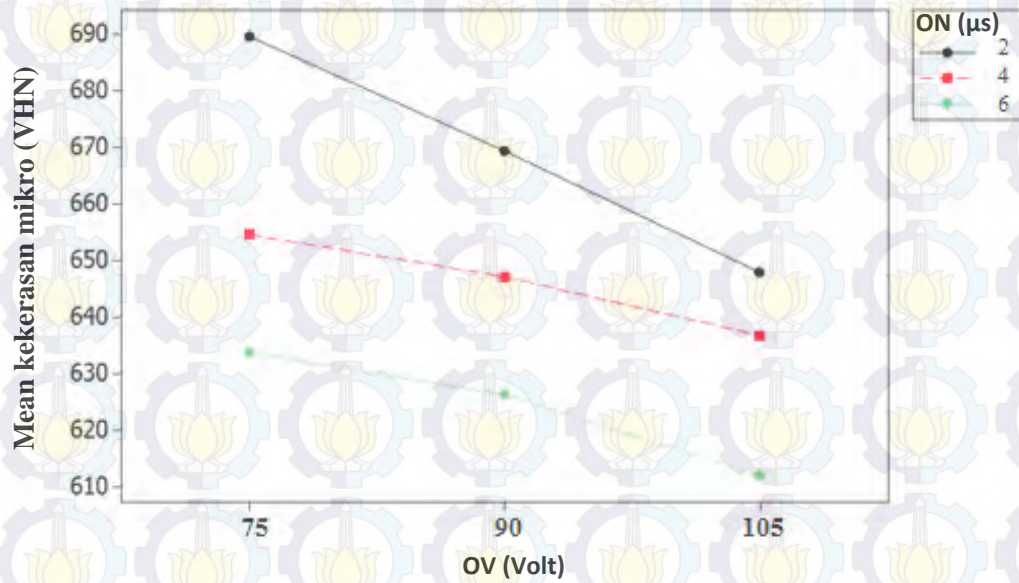


Gambar 4.16: Plot uji distribusi normal pada respon kekerasan mikro

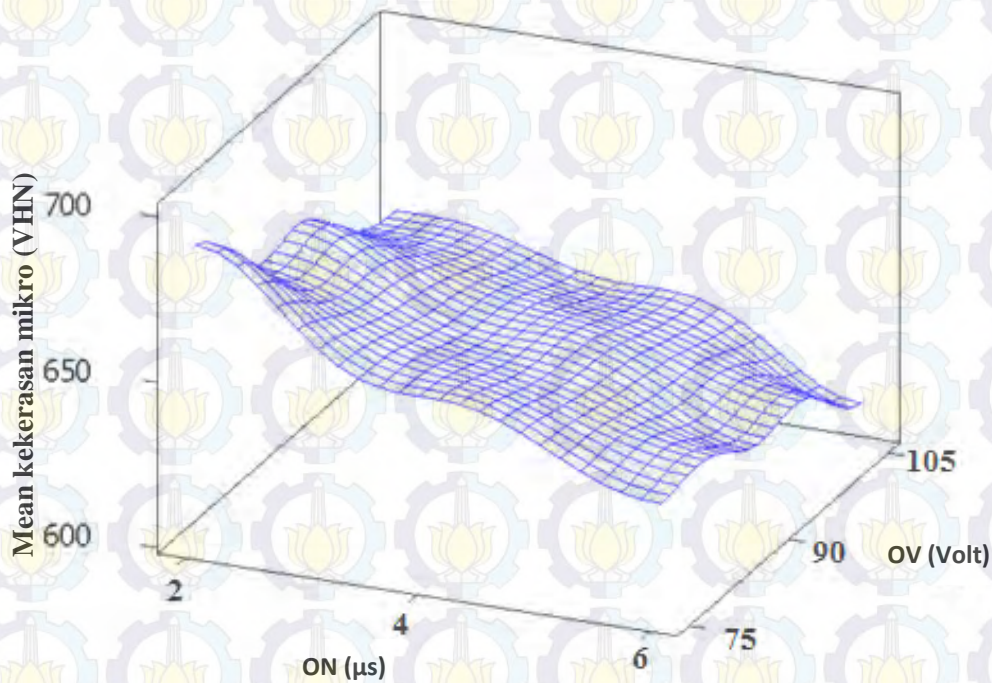




Secara grafik, hubungan antara faktor ON dan OV pada proses pemesian WEDM terhadap respon kekerasan mikro ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18.



Gambar 4.17: Grafik pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon kekerasan mikro.



Gambar 4.18: Grafik *surface plot* pengaruh faktor ON dan OV terhadap respon kekerasan mikro.





Dari Gambar 4.17 dan 4.18 dapat dilihat bahwa secara umum nilai kekerasan mikro menurun secara signifikan ketika kedua faktor meningkat secara bersamaan. Nilai kekerasan mikro turun drastis pada pengaturan ON sebesar 4  $\mu$ s dan 6  $\mu$ s. Nilai kekerasan mikro tertinggi terjadi pada ON sebesar 2  $\mu$ s dan OV sebesar 75 V, pada kombinasi ini kekerasan mikro yang dihasilkan sebesar 698,7 VHN. Nilai kekerasan mikro terendah terjadi pada ON sebesar 6  $\mu$ s dan OV sebesar 105 V adalah sebesar 609,03 VHN.

Berdasarkan pengamatan kekerasan mikro pada lapisan *recast* yang ditunjukkan oleh Tabel 4.10, terjadi penurunan kekerasan mikro pada lapisan *recast*. Penurunan nilai kekerasan mikro pada lapisan *recast* terjadi karena benda kerja telah mengalami proses perlakuan panas sebelum di WEDM. Perlakuan panas dilakukan hingga kekerasan maksimal yang mampu dicapai oleh material tersebut. Proses WEDM memanfaatkan energi panas untuk menikis benda kerja. Temperatur yang menumbuk benda kerja bisa mencapai 8.000°C sampai 20.000°C (Ho dkk., 2010), sehingga terjadi pelelehan pada benda kerja. Pada benda kerja pelelehan dan pembekuan dengan cepat terjadi tidak pada seluruh benda kerja, melainkan pada permukaan yang mengalami proses pemotongan, bagian ini disebut dengan lapisan *recast*.

Peningkatan ON maka frekuensi bunga api yang menumbuk benda kerja akan semakin tinggi. Hal ini mengakibatkan benda kerja yang meleleh dan membeku lagi semakin banyak. Peningkatan OV maka beda potensial yang terjadi antara kawat elektroda dan benda kerja akan semakin tinggi, sehingga panas yang terkonduksi pada benda kerja akan semakin jauh dari permukaan benda kerja. Penumbukan panas yang sering dan dalam akan mengakibatkan, panas yang diterima oleh benda kerja semakin tinggi. Semakin tinggi panas yang diterima oleh benda kerja menyebabkan laju pendinginan pada benda kerja akan semakin rendah, sehingga proses solidifikasi menjadi lambat. Pada benda kerja yang mengalami pemanasan rendah akan diikuti laju pendinginan yang cepat, sehingga proses solidifikasi juga lebih cepat. Proses solidifikasi yang cepat akan menyebabkan kekerasan pada benda kerja yang telah mengalami proses pemotongan semakin rendah, demikian juga sebaliknya.





Kedalaman indentasi yang ditunjukkan oleh Tabel 4.13 menunjukkan seluruh penumbukan indenter pada penelitian ini sampai menembus lapisan *recast* menuju ke material induk. Jika dibandingkan dengan ketebalan lapisan *recast* yang ditunjukkan oleh Tabel 4.7. Seluruh penumbukan *indenter* pada penelitian ini sampai menembus pada material induk. Pada kombinasi ON dan OV yang rendah ketebalan lapisan *recast* yang terbentuk adalah sebesar 4,53  $\mu\text{m}$ , sedangkan kedalaman indentasi adalah sebesar 7,83  $\mu\text{m}$ . Hal itu menunjukkan indentasi menembus sampai material induk, sehingga nilai kekerasan mikro tinggi adalah sebesar 698,42 VHN. Dibandingkan dengan kombinasi ON yang tinggi dan OV yang tinggi, kedalaman lapisan *recast* yang terbentuk adalah sebesar 6,16  $\mu\text{m}$ , sedangkan kedalaman indentasi adalah sebesar 8,39  $\mu\text{m}$ . Pada kombinasi tersebut didapatkan kekerasan mikro sebesar 609,03 VHN. Kekerasan pada material induk berada pada rentang antara 712,6 VHN sampai 713,4 VHN. Berdasarkan hal yang telah dijelaskan maka dapat ditarik kesimpulan, semakin tebal lapisan *recast* akan menahan laju indentasi. Hal itu mengakibatkan indenter yang menembus sampai ke material induk semakin sedikit. Pada proses WEDM terjadi pemlelehan dan pembekuan material secara cepat. Hal ini memungkinkan adanya udara yang terperangkap, sehingga menimbulkan rongga pada lapisan *recast*. Rongga udara tersebut mengakibatkan nilai kekerasan mikro juga menurun. Dari hasil pengamatan ini dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan kekerasan mikro pada lapisan *recast*, sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa faktor ON dan OV berbanding terbalik terhadap respon kekerasan mikro. Fenomena serupa juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Newton dkk. (2009).





## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul Pengaruh Pulse ON Time dan Open Voltage Terhadap Integritas Permukaan Benda Kerja (IPBK) Hasil Pemotongan Baja Perkakas Buderus 2080 Pada Proses *Wire Electrical Discharge Machining* (WEDM), maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan *pulse on time* dan *open voltage*, juga akan meningkatkan nilai kekasaran permukaan. *Pulse on time* yang tinggi mengakibatkan frekuensi percikan bunga api yang menumbuk benda kerja semakin tinggi, sehingga bahan yang terkikis semakin banyak. *Open voltage* yang tinggi akan menyebabkan energi *discharge* yang dilepaskan selama proses pemesinan semakin besar, sehingga bahan yang terkikis semakin banyak. Hal ini mempengaruhi jumlah *pockmark*, *globule*, *debris* dan kawah pada permukaan benda kerja, sehingga mempengaruhi topografi permukaan benda kerja.
2. Peningkatan *pulse on time* dan *open voltage*, maka lapisan *recast* yang terbentuk akan semakin tebal. *Pulse on time* yang tinggi mengakibatkan frekuensi percikan bunga api yang menumbuk benda kerja semakin tinggi, sehingga material yang meleleh dan membeku dengan cepat akan semakin banyak. *Open voltage* yang tinggi akan menyebabkan energi panas yang menumbuk benda kerja akan semakin tinggi, sehingga panas yang terkonduksi pada benda kerja akan semakin jauh dari permukaan benda kerja.
3. Peningkatan nilai pada faktor *pulse on time* dan *open voltage*, juga akan diikuti dengan penurunan nilai kekerasan mikro pada lapisan *recast*. *Pulse on time* yang tinggi mengakibatkan material benda kerja yang meleleh dan membeku lagi semakin banyak. *Open voltage* Semakin tinggi OV maka beda potensial yang terjadi antara kawat elektroda dan benda kerja akan semakin tinggi, sehingga panas yang terkonduksi pada benda kerja akan semakin jauh dari permukaan benda kerja. Penumbukan panas yang sering dan dalam akan





mengakibatkan, panas yang diterima oleh benda kerja semakin tinggi. Semakin tinggi panas yang diterima oleh benda kerja menyebabkan laju pendinginan pada benda kerja akan semakin rendah, sehingga proses pembekuan material yang telah meleleh menjadi lambat. Proses pembekuan material yang telah meleleh yang cepat akan menyebabkan kekerasan pada benda kerja yang telah mengalami proses pemotongan semakin rendah.

## 5.2 Saran

- Penelitian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan kawat elektroda dan material benda kerja yang berbeda.
- Melakukan analisis terjadinya difusi kawat elektroda pada permukaan benda kerja yang mengalami pemesinan dengan menggunakan EDAX.



## LAMPIRAN 1

Tabel L-1: Spesifikasi Mesin WEDM CHMER CW32GF

Item	Spesification
Table travel (X and Y axis)	350 mm x 250 mm ( 13.7" x 9.8")
Z axis Travel	220 mm (6.6 ")
Auxiliary travel ( u and V axis)	80 mm x 80 mm ( 3.1"x 3.1")
Work table size (W x D)	600 mm x 400 mm (23.6"x 15.7")
Work tank dimensions (W x D)	895 mm x 650 mm (35.2"x 25.5")
Maximum height of work piece	220 mm (8.6 ") submerge
Maximum weight of work piece	450 kg (990 lb) submerge
Distance from floor to table top	965 mm (38")
Taper angle	20°/80 mm (3.1")
Wire tension	300 g to 2300 g (0.66 lb to 5.06 lb)
Wire speed feed (max)	250 mm/sec (9.8 in/sec)
Wire diamter	0.15 to 0.30 mm ( 0.006 to 0.012 in)
Wire pool volume (max)	6 kg (13.2 lb)
Machine tool dimension ( W x D x H)	1650 mm x 1900 mm x 2040 mm
Machine tool dimension ( W x D )	2250 mm x 2200 mm (88.56" x 86.6 ")
Machine tool weight	2800 kg

### *DIELEKTRIK TANK*

Item	Spesification
External dimensions ( W x D x H)	550 mm x 2200 mm x 1770 mm
Weight (empty)	230 kg (506 lb)
Capacity	5301 (138 gal)
Deionizer	10 l (2.6 gal)
Filtering system	2 replaceable paper filter

Sumber: *Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32GF*



## LAMPIRAN 2

Tabel L-2: Interval Seting Faktor Pada WEDM CHMER CW32GF

Simbol	Nama faktor	Interval seting
OV	<i>Open voltage</i>	0 ~ 15 (70 V ~ 145 V)
		0 = 70 V ; 10 = 120 V
		1 = 75 V ; 11 = 125 V
		2 = 80 V ; 12 = 130 V
		3 = 85 V ; 13 = 135 V
		4 = 90 V ; 14 = 140 V
		5 = 95 V ; 15 = 145 V
		6 = 100 V
		7 = 105V
		8 = 110 V
LP	<i>Low Power</i>	9 = 115 V
		0 ~ 30
		LP = 0 DC rough cutting
		LP = 1 DC spark alignment
		LP = 2 DC fine cutting
		LP = 20 DC moderate cutting
		LP = 3 ~ 9 not available
		LP = 10 AC rough cutting
		LP = 11 AC spark alignment
		LP = 12 AC fine cutting
ON	<i>On Time</i>	LP = 30 AC moderate cutting
		LP = 13 ~ 29 Super finish cutting
		1 ~ 10
		1 = 0.1
		2 = 0.2 $\mu$ s
		3 = 0.3 $\mu$ s
		4 = 0.4 $\mu$ s
		5 = 0.5 $\mu$ s
		6 = 0.6 $\mu$ s
		7 = 0.7 $\mu$ s
OFF	<i>Off time</i>	8 = 0.8 $\mu$ s
		9 = 0.9 $\mu$ s
AN	<i>Arc On time</i>	10 = 1 $\mu$ s
		7 ~ 50
AFF	<i>Arc Of time</i>	7 = 7 $\mu$ s...50 = 50 $\mu$ s
SV	<i>Servo Voltage</i>	1 ~ 7
FR	<i>Feedrate override</i>	3 ~ 50
WF	<i>Wire feed</i>	10V ~ 75V
		0 ~ 50
		0 ~ 15 (70 V ~ 145 V)
		0 = 0 mm/sec ; 10 = 120 mm/sec
		1 = 0 mm/sec ; 11 = 125 mm/sec
		2 = 5 mm/sec ; 12 = 130 mm/sec
		3 = 25 mm/sec ; 13 = 135 mm/sec
		4 = 60 mm/sec ; 14 = 140 mm/sec
		5 = 90 V ; 15 = 145 mm/sec
		6 = 100 V
WL	<i>Water flow</i>	7 = 105V
FM	<i>Feedrate mode</i>	8 = 110 V
F	<i>Feedrate</i>	9 = 115 V
		0 ~ 7
		0 ~ 1
		0 ~ 500

Sumber: Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32F



### LAMPIRAN 3

Gambar L-1: Sertifikat Material Buderus 2080

Buderus | Edelstahl

<b>PT Wietpanda Industri Steel</b> <b>Jl. Kaliwaran 54-56</b> <b>RI 60285 SURABAYA</b>		Werkstoffzeugnis-Nr.: <b>A3009101201</b> <b>EN 10 204 § 2.2</b> Kunden Best.-Nr.: <b>206/WLS/2012</b> Rechnung-Nr.: <b>3037025225</b> Rechnungs-Datum: <b>23.04.2012</b>	<b>Buderus</b> <b>EDELSTAHL</b>
--	--	--	------------------------------------

Ges. Anzahl  <b>286</b>	Materialbezeichnung: <b>Low alloy steels</b> <b>1.2080 / X210Cr17</b> <b>FLAT BARS</b> <b>ANNEALED</b>	Gesamtgewicht kg  <b>12,264.9</b>
-------------------------------	---	---

Ausführung:

Abmessung: 20	Flat 10 x 100 mm x R/L HEAT NO: 100SK	475.2 Kg
Abmessung: 20	Flat 15 x 40 mm x R/L HEAT NO: 100SK	285.1 Kg
Abmessung: 40	Flat 15 x 50 mm x R/L HEAT NO: 100SK	712.8 Kg
Abmessung: 20	Flat 15 x 80 mm x R/L HEAT NO: 100SK	570.2 Kg
Abmessung: 20	Flat 15 x 100 mm x R/L HEAT NO: 100SK	712.8 Kg
Abmessung: 20	Flat 15 x 120 mm x R/L HEAT NO: 100SK	855.4 Kg
Abmessung: 20	Flat 15 x 150 mm x R/L HEAT NO: 100SK	1069.2 Kg
Abmessung: 6	Flat 20 x 110 mm x R/L HEAT NO: 100SK	1169.0 Kg
Abmessung: 50	Flat 25 x 40 mm x R/L HEAT NO: 100SK	1188.0 Kg
Abmessung: 50	Flat 25 x 50 mm x R/L HEAT NO: 100SK	1485.0 Kg
Abmessung: 5	Flat 25 x 150 mm x R/L HEAT NO: 100SK	445.5 Kg
Abmessung: 5	Flat 25 x 200 mm x R/L HEAT NO: 100SK	594.0 Kg
Abmessung: 5	Flat 25 x 410 mm x R/L HEAT NO: 100SK	1217.7 Kg
Abmessung: 5	Flat 25 x 500 mm x R/L HEAT NO: 100SK	1485.0 Kg

Element	C	Si	Mn	Cr
ist	1.90-2.00	0.20-0.30	0.25-0.30	9.80-12.00

Bemerkungen:

Wir besatigen, dass die Angaben der oben aufgefiihrten Lieferung denen des Ursprungszeugnisses nach EN 10204 § 2.2 o. 3.1 entsprechen.

Buderus Edelstahl GmbH

Qualitätskontrolle

Wetzlar, 23.04.2012

Fr. G. Lauerbach

Buderus | Edelstahl

Buderus | Edelstahl

Sumber: Wietpanda, Surabaya.



## LAMPIRAN 4

Gambar L-2: Sertifikat Proses Perlakuan Panas



**PARAGON**  
SPECIAL METAL AND SERVICES

PT. PARAGON SPESIAL METAL

Jl. Raya Kedung Asem No 9 / C-1  
Surabaya 60298 – INDONESIA

Telp. : +62-31-87157160, 8715166,

8709172, 8722192

Fax. : +62-31-8722192, 8706596

E Mail : paragon@sbj.centrin.net.id

Jl. Flores III Blok C3-1, kawasan industri MM

2100

Cibitung, Bekasi - Indonesia

Telp. 021-89982006, 89981865

Fax. 021-89982007

Email : paragon.jkt@cbn.net.id

paragon.jkt@gmail.com

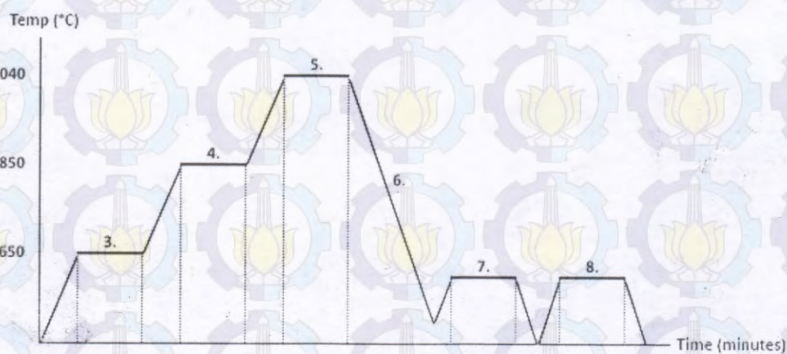
### Heat Treatment Certificate

Customer : SAIFUL ARIF, Sdr  
PK No : 186  
PK Date : 11-09-2014  
Amount : 2PCS  
Material : 2080  
Part Name : PLATE 1

Size/Photo : BENDA KERJA

*This is to certify that the material have been hardened with the process as follows:*

No.	Process	Temp (°C)	Time (minutes)	Date of Process	Hardness Acquired (HRC)
1.	Soft Annealing				
2.	Stress Relieving				
3.	Pre Heating I	600	45	12/09/2014	
4.	Pre Heating II			12/09/2014	
5.	Austenitizing	960	45	12/09/2014	
6.	Quenching Media	Cold Q		12/09/2014	
7.	Tempering I	180	120	12/09/2014	
8.	Tempering II	180	120	13/09/2014	60-61 HRC
9.	Tempering III				
10.	Carburizing				
11.	Nitro Carburizing				



Prepared by

**PARAGON**

PT. PARAGON SPESIAL METAL

Jl. Raya Kedung Asem No 9 / C-1

Surabaya 60298 – INDONESIA

Telp. : +62-31-87157160, 8715166,

8709172, 8722192

Fax. : +62-31-8722192, 8706596

E Mail : paragon@sbj.centrin.net.id

Sumber: Paragon, Surabaya.



## LAMPIRAN 5

### Uji Tukey Dari ON Dan OV Terhadap Kekasaran Permukaan

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

ON	N	Mean	Grouping
3	6	2,3	A
2	6	1,9	B
1	6	1,5	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals  
Response Variable KP

All Pairwise Comparisons among Levels of ON

ON = 1 subtracted from:

ON	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	0,3506	0,03566	9,831	0,0000
3	0,7400	0,03566	20,753	0,0000

ON = 2 subtracted from:

ON	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	0,3894	0,03566	10,92	0,0000

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

OV	N	Mean	Grouping
3	6	2,1	A
2	6	1,9	B
1	6	1,7	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals  
Response Variable KP

All Pairwise Comparisons among Levels of OV

OV = 1 subtracted from:

OV	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	0,1100	0,03566	3,085	0,0221
3	0,3472	0,03566	9,738	0,0000

OV = 2 subtracted from:

OV	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	0,2372	0,03566	6,653	0,0001



## LAMPIRAN 6.A

Tabel L-3: Data Hasil Pengujian Lapisan *Recast*

<b>Kombinasi</b>	<b>X111</b>			<b>X121</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	4,46	3,80	3,99	5,10	4,78	4,55
Tebal LR titik 2	3,94	5,64	4,64	5,63	5,24	4,61
Tebal LR titik 3	3,16	5,43	3,16	4,99	3,76	5,64
Tebal LR titik 4	3,38	3,55	6,24	4,94	5,81	5,02
Tebal LR titik 5	4,69	3,03	7,25	4,32	4,17	4,25
Tebal LR titik 6	3,75	3,22	4,36	5,01	3,44	4,86
Tebal LR titik 7	4,88	4,80	5,06	4,78	4,32	4,59
Tebal LR titik 8	3,94	5,32	3,53	6,19	4,70	4,90
Tebal LR titik 9	5,50	5,11	6,41	5,46	5,22	3,53
Tebal LR titik 10	4,51	4,38	4,92	3,51	5,32	4,69
Rata-rata LR per area	4,22	4,42	4,95	4,99	4,67	4,66
Rata-rata LR per kombinasi	4,53			4,77		
<b>Kombinasi</b>	<b>X131</b>			<b>X211</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	4,85	4,22	4,89	4,39	5,99	5,64
Tebal LR titik 2	4,52	4,35	4,16	3,57	2,47	5,54
Tebal LR titik 3	3,55	4,99	5,14	3,38	3,29	7,21
Tebal LR titik 4	6,81	5,12	5,04	3,03	7,4	6,18
Tebal LR titik 5	6,52	5,25	5,96	3,86	6,22	6,79
Tebal LR titik 6	4,44	5,34	5,15	4,39	4,70	6,85
Tebal LR titik 7	5,48	3,74	5,8	5,22	4,70	7,52
Tebal LR titik 8	4,36	4,74	4,35	5,68	5,99	7,18
Tebal LR titik 9	4,59	4,15	4,73	5,87	2,58	7,18
Tebal LR titik 10	6,37	6,97	5,9	4,31	5,99	5,33
Rata-rata LR per area	5,14	4,88	5,11	4,37	4,93	6,54
Rata-rata LR per kombinasi	5,04			5,28		



Tabel L-3: lanjutan

<b>Kombinasi</b>	<b>X221</b>			<b>X231</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	3,75	4,00	3,94	11,65	12,09	8,78
Tebal LR titik 2	4,10	3,51	6,30	3,90	3,17	3,28
Tebal LR titik 3	4,33	8,08	8,14	5,92	4,70	5,62
Tebal LR titik 4	4,10	5,50	8,80	5,18	4,34	5,97
Tebal LR titik 5	2,93	5,00	7,75	5,33	6,11	4,57
Tebal LR titik 6	3,16	2,34	7,48	4,30	4,70	6,09
Tebal LR titik 7	4,22	4,41	8,63	4,00	5,75	5,85
Tebal LR titik 8	4,33	5,67	8,82	3,70	7,28	4,45
Tebal LR titik 9	4,68	3,51	8,27	3,25	7,40	4,57
Tebal LR titik 10	4,68	4,50	8,28	5,11	4,46	4,80
Rata-rata LR per area	4,03	4,65	7,64	5,23	6,00	5,40
Rata-rata LR per kombinasi	5,44			5,54		
<b>Kombinasi</b>	<b>X311</b>			<b>X321</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	7,10	4,44	6,45	4,27	3,29	7,15
Tebal LR titik 2	4,37	5,62	4,55	3,79	4,93	5,04
Tebal LR titik 3	4,36	6,36	4,74	8,77	5,99	3,25
Tebal LR titik 4	5,06	6,66	8,16	5,78	6,46	8,63
Tebal LR titik 5	5,01	6,06	7,10	5,45	6,09	5,63
Tebal LR titik 6	5,37	4,89	6,58	5,99	3,71	5,11
Tebal LR titik 7	6,73	4,50	5,52	6,52	3,17	8,45
Tebal LR titik 8	5,52	4,69	4,33	4,98	3,05	4,08
Tebal LR titik 9	5,64	5,46	5,92	6,64	6,03	5,66
Tebal LR titik 10	4,93	6,81	5,66	7,59	9,86	9,65
Rata-rata LR per area	5,41	5,55	5,90	5,98	5,26	6,27
Rata-rata LR per kombinasi	5,62			5,83		



Tabel L-3: lanjutan

<b>Kombinasi</b>	<b>X131</b>			<b>X112</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	6,82	5,75	5,94	5,01	3,57	4,64
Tebal LR titik 2	6,51	5,44	7,89	3,58	4,41	4,14
Tebal LR titik 3	7,57	4,27	7,79	3,55	4,06	3,45
Tebal LR titik 4	6,01	7,28	5,04	6,17	3,71	3,08
Tebal LR titik 5	6,19	6,81	8,44	3,63	5,94	8,29
Tebal LR titik 6	3,94	4,81	6,46	5,04	3,96	4,47
Tebal LR titik 7	6,76	6,58	6,22	3,83	3,71	3,85
Tebal LR titik 8	7,70	7,25	5,17	3,73	6,71	5,99
Tebal LR titik 9	4,02	4,51	8,81	4,64	3,22	3,71
Tebal LR titik 10	5,18	4,69	4,34	5,27	3,05	3,27
Rata-rata LR per area	6,07	5,74	6,61	4,45	4,23	4,49
Rata-rata LR per kombinasi	6,14			4,39		
<b>Kombinasi</b>	<b>X122</b>			<b>X132</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	4,47	5,15	5,15	7,11	5,62	5,83
Tebal LR titik 2	4,15	4,22	4,93	2,93	4,81	5,51
Tebal LR titik 3	5,23	5,67	5,63	5,51	4,44	5,99
Tebal LR titik 4	6,26	6,21	3,75	5,56	3,89	4,22
Tebal LR titik 5	4,20	3,72	3,40	5,36	4,83	5,4
Tebal LR titik 6	4,45	4,74	4,17	5,66	5,05	6,45
Tebal LR titik 7	4,91	4,1	3,53	4,57	5,09	4,7
Tebal LR titik 8	4,59	4,2	3,61	4,61	5,49	4,37
Tebal LR titik 9	5,00	4,08	4,45	5,27	5,33	4,22
Tebal LR titik 10	3,85	5,15	3,64	4,93	5,49	4,7
Rata-rata LR per area	4,711	4,724	4,226	5,151	5,004	5,139
Rata-rata LR per kombinasi	4,47			5,15		



Tabel L-3: lanjutan

<b>Kombinasi</b>	<b>X212</b>			<b>X222</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	6,27	5,40	4,10	6,00	4,96	4,23
Tebal LR titik 2	4,27	7,32	2,51	5,52	6,74	7,38
Tebal LR titik 3	3,55	9,51	5,86	6,52	4,62	5,56
Tebal LR titik 4	4,07	7,51	5,42	4,58	5,68	4,56
Tebal LR titik 5	5,68	5,28	3,99	6,48	5,94	5,80
Tebal LR titik 6	5,54	4,81	7,25	6,11	7,40	4,11
Tebal LR titik 7	3,66	6,46	5,82	5,20	4,51	5,64
Tebal LR titik 8	4,49	3,52	3,70	4,93	4,06	3,76
Tebal LR titik 9	4,50	3,99	3,30	5,25	5,95	4,46
Tebal LR titik 10	5,22	3,99	6,08	4,81	5,63	3,64
Rata-rata LR per area	4,73	5,78	4,80	5,54	5,55	4,91
Rata-rata LR per kombinasi	5,10			5,33		
<b>Kombinasi</b>	<b>X232</b>			<b>X312</b>		
<b>Area pengamatan</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tebal LR titik 1	4,11	6,09	3,52	4,62	5,61	5,09
Tebal LR titik 2	4,93	4,30	3,99	5,45	6,53	5,26
Tebal LR titik 3	7,63	4,49	7,39	5,18	5,91	6,19
Tebal LR titik 4	5,67	5,64	5,16	4,38	5,08	5,66
Tebal LR titik 5	5,05	6,76	3,40	5,82	5,41	5,94
Tebal LR titik 6	5,40	5,68	4,69	7,49	4,39	5,19
Tebal LR titik 7	5,61	5,27	6,20	5,10	6,13	4,28
Tebal LR titik 8	4,93	6,89	5,40	5,24	5,96	5,52
Tebal LR titik 9	5,61	4,47	5,75	6,78	5,39	5,94
Tebal LR titik 10	5,52	5,75	7,98	7,57	6,53	5,44
Rata-rata LR per area	5,45	5,53	5,35	5,76	5,69	5,45
Rata-rata LR per kombinasi	5,44			5,64		



Tabel L-3: lanjutan

Kombinasi	X322			X332		
	1	2	3	1	2	3
Tebal LR titik 1	12,23	6,97	4,31	6,76	8,78	5,02
Tebal LR titik 2	8,40	3,64	5,91	4,86	8,43	6,65
Tebal LR titik 3	8,09	4,37	2,96	5,89	5,74	6,65
Tebal LR titik 4	4,80	3,75	9,13	5,32	4,69	5,32
Tebal LR titik 5	7,67	3,16	8,72	3,98	4,22	3,65
Tebal LR titik 6	5,95	3,33	6,35	3,40	5,74	5,76
Tebal LR titik 7	7,82	5,97	5,32	8,48	4,11	6,79
Tebal LR titik 8	3,97	4,56	8,57	5,32	3,75	7,39
Tebal LR titik 9	5,82	4,06	3,78	5,46	7,14	6,35
Tebal LR titik 10	5,45	4,48	4,73	9,49	10,07	9,60
Rata-rata LR per area	7,02	4,43	5,98	5,90	6,27	6,32
Rata-rata LR per kombinasi	5,81			6,16		



## LAMPIRAN 6.B

### Uji Tukey Dari ON dan OV Terhadap Lapisan *Recast*

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

ON	N	Mean	Grouping
3	6	5,9	A
2	6	5,4	B
1	6	4,7	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals

Response Variable LR

All Pairwise Comparisons among Levels of ON

ON = 1 subtracted from:

ON	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	0,6237	0,05797	10,76	0,0000
3	1,1326	0,05797	19,54	0,0000

ON = 2 subtracted from:

ON	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	0,5088	0,05797	8,777	0,0000

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

OV	N	Mean	Grouping
3	6	5,6	A
2	6	5,3	B
1	6	5,1	C

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals

Response Variable LR

All Pairwise Comparisons among Levels of OV

OV = 1 subtracted from:

OV	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	0,1974	0,05797	3,406	0,0122
3	0,4783	0,05797	8,251	0,0000

OV = 2 subtracted from:

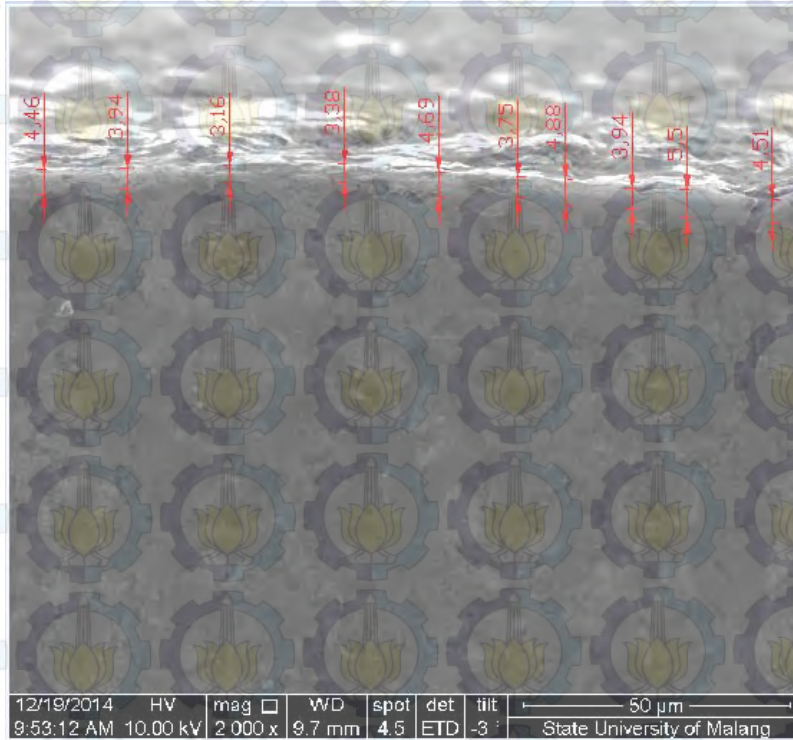
OV	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	0,2809	0,05797	4,845	0,0009



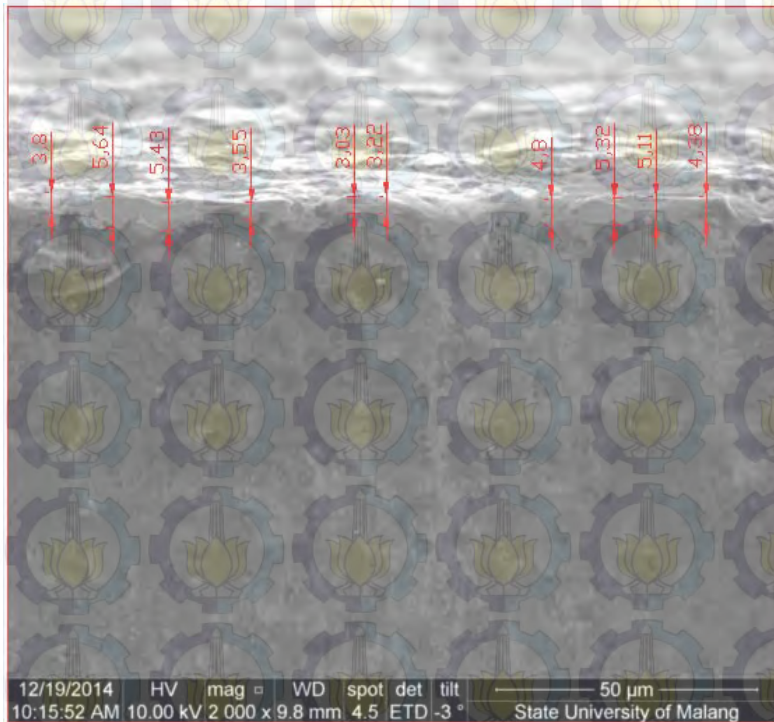
## LAMPIRAN 6.C

Bentuk Lapisan *Recast* Hasil Pengamatan Menggunakan *Scaning Electron Microscope*

X111 sisi kiri

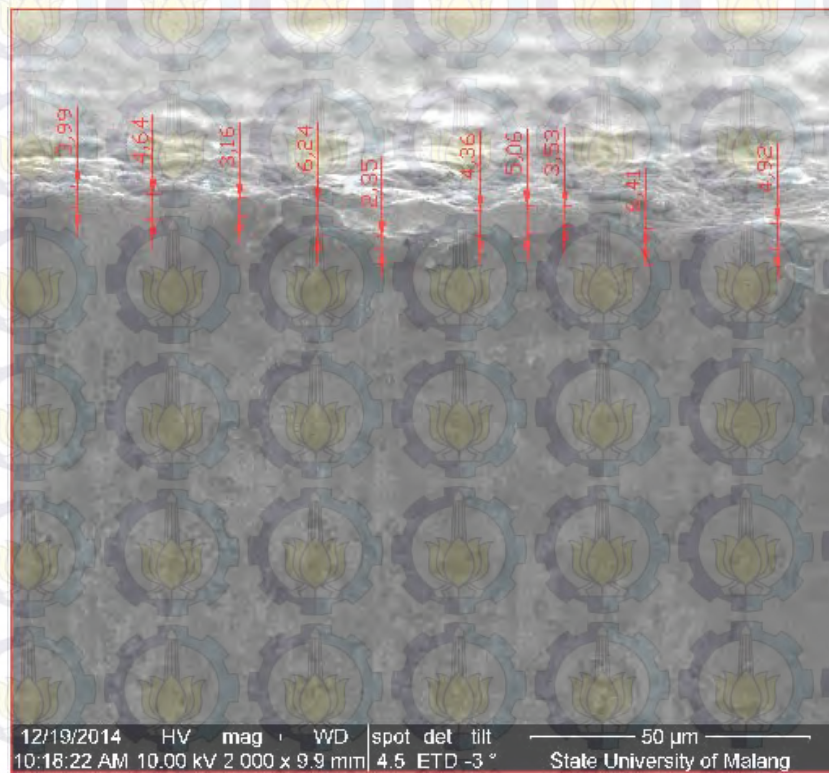


X111 sisi tengah

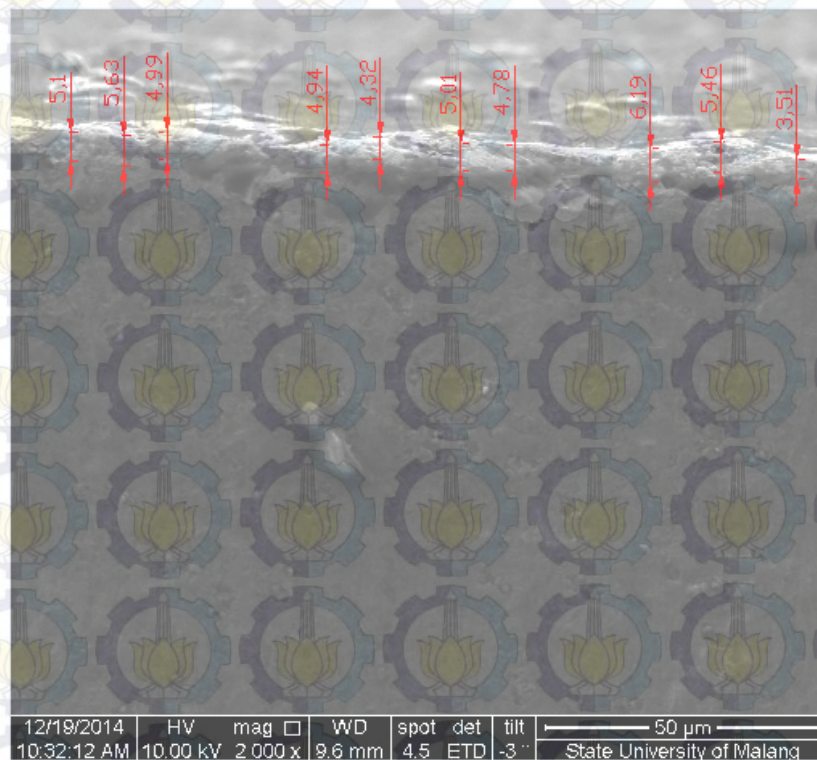




X111 sisi kanan

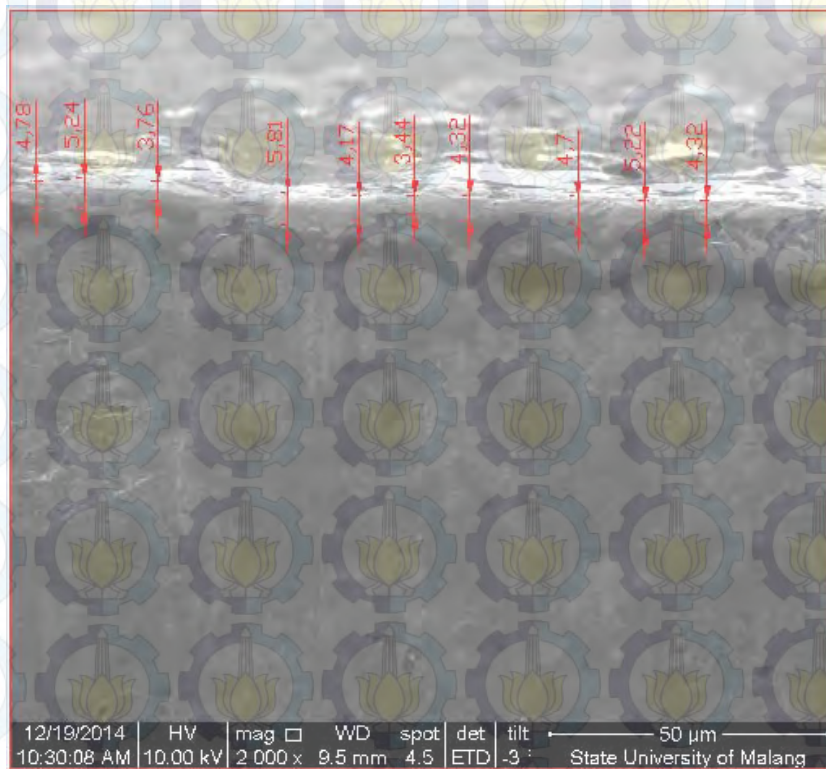


X121 sisi kiri

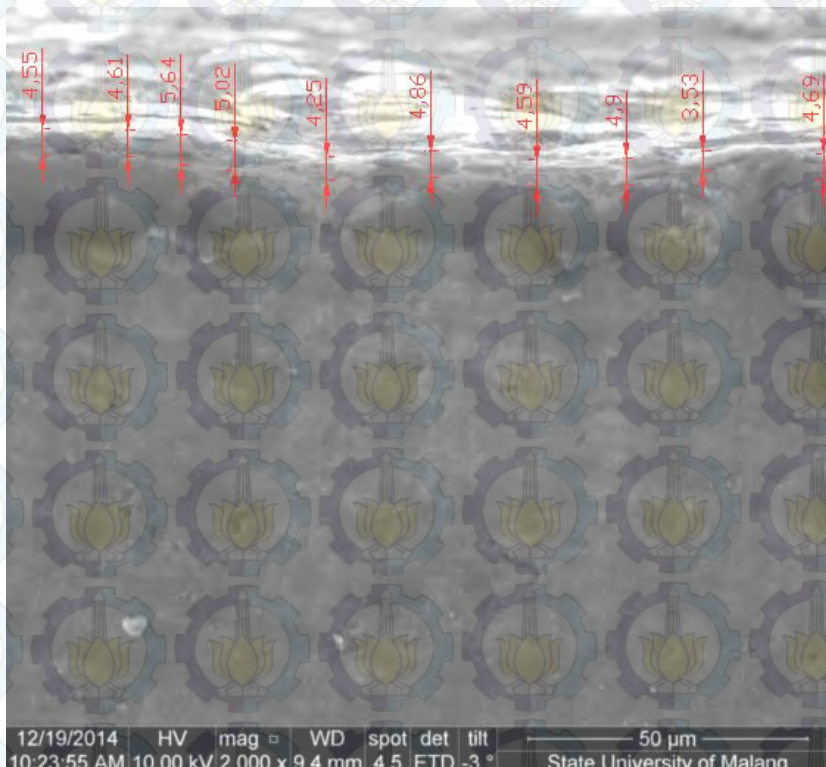




X121 sisi tengah

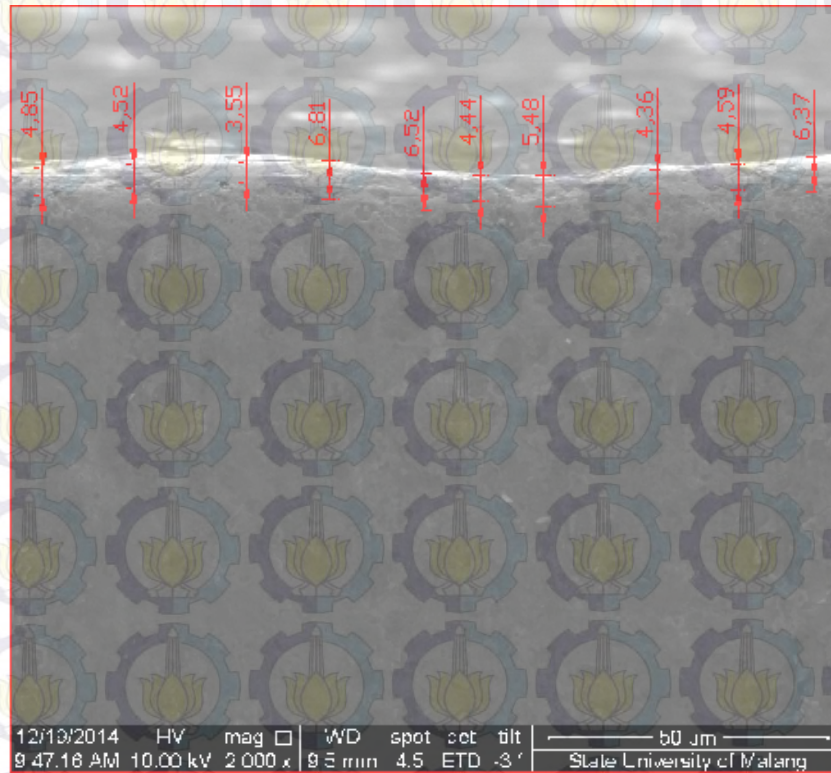


X121 sisi kanan





X131 sisi kiri

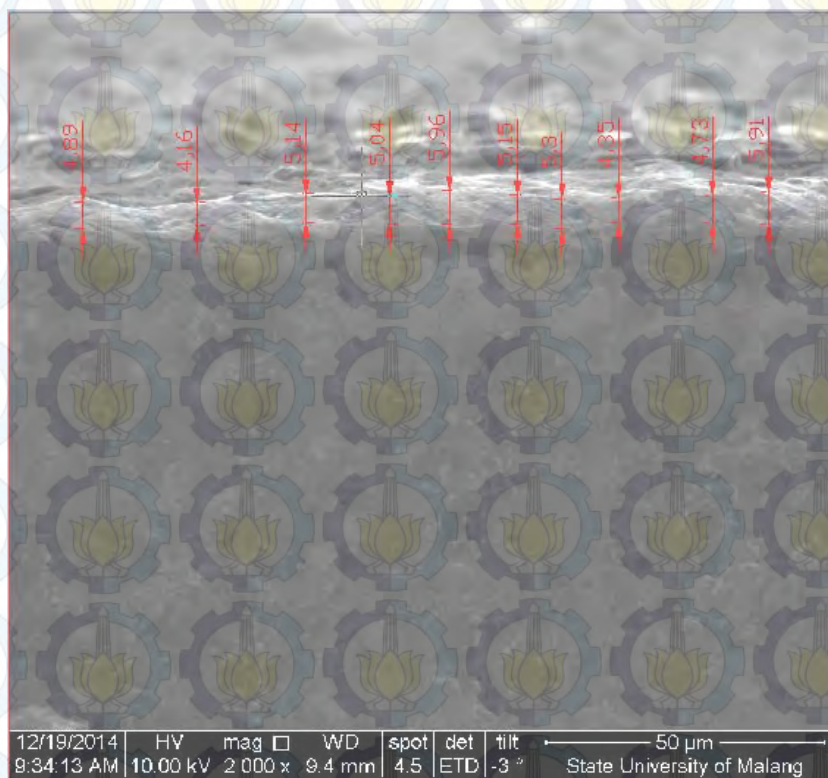


X131 sisi tengah

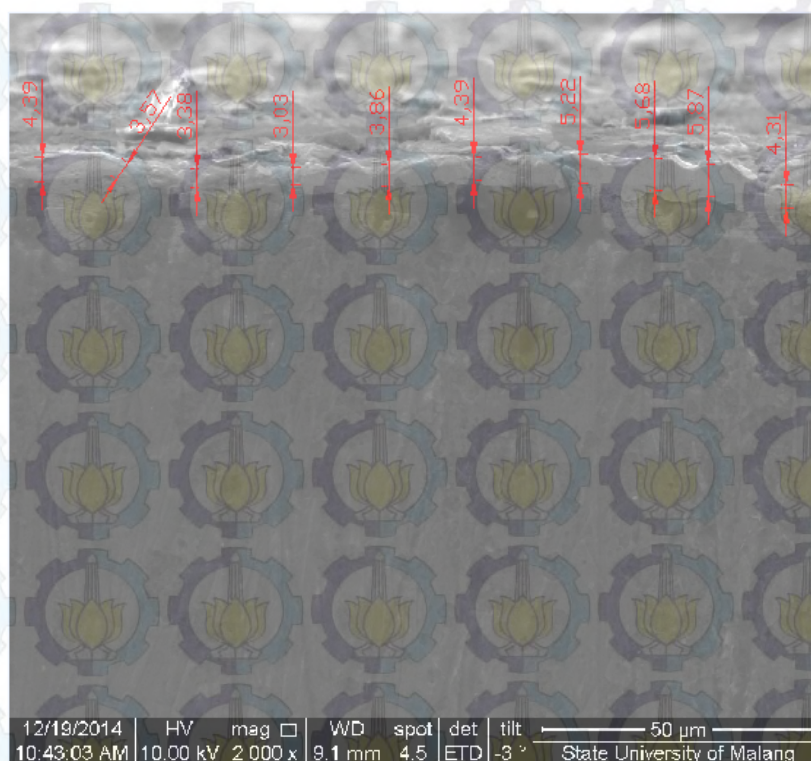




X131 sisi kanan

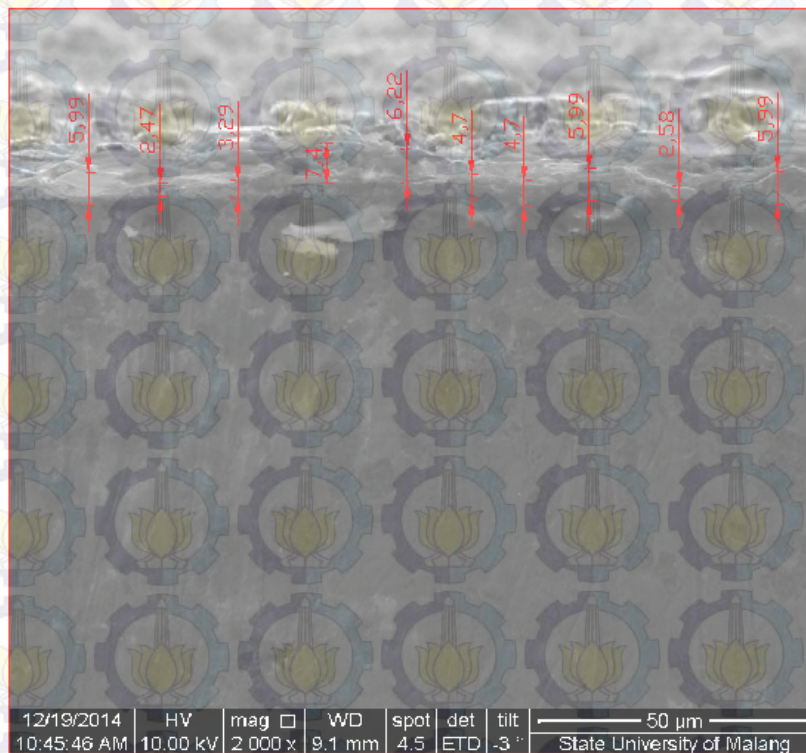


X211 sisi kiri

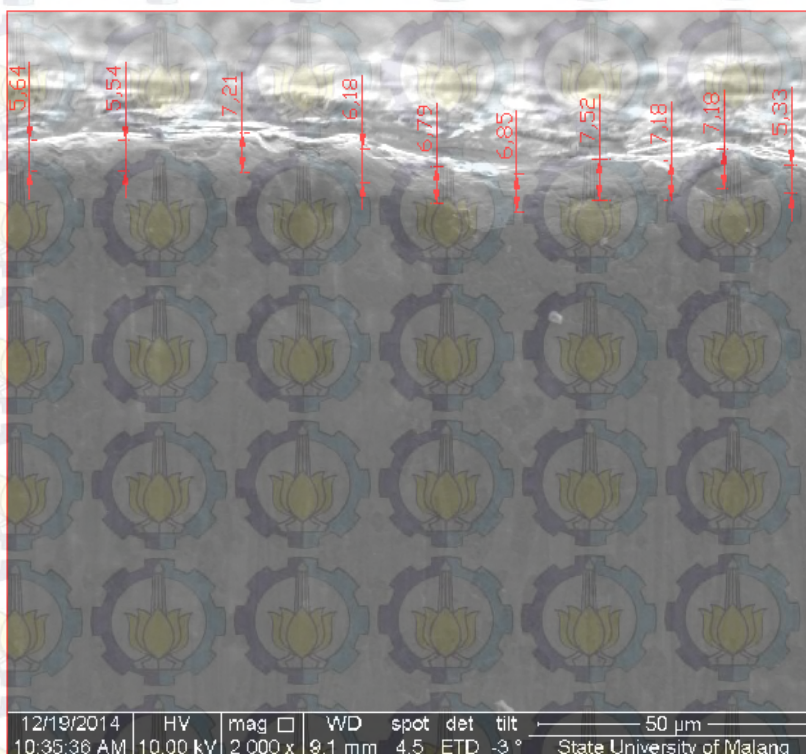




X211 sisi tengah

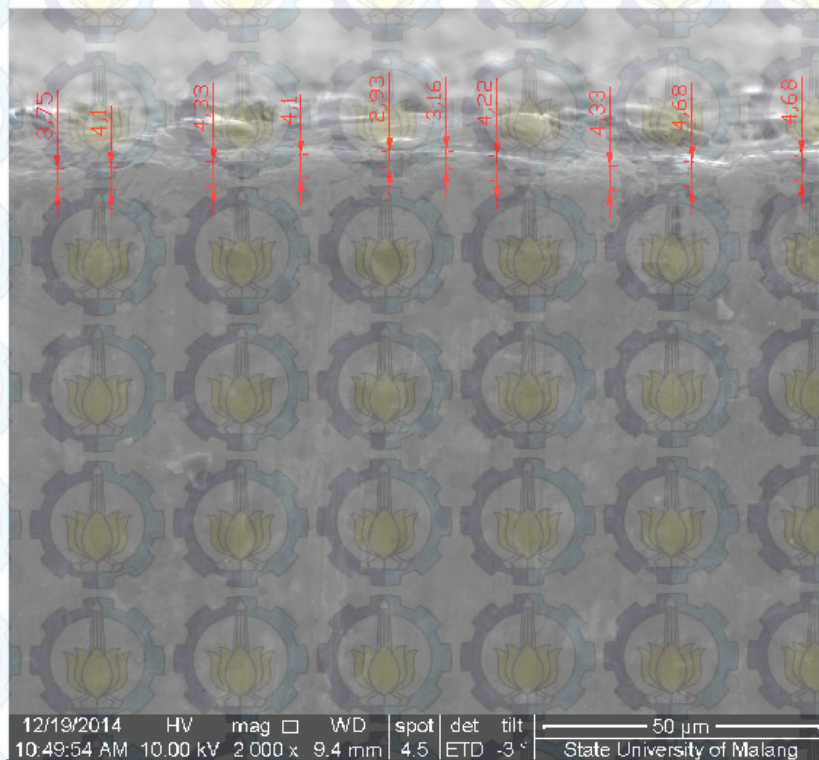


X211 sisi kanan





X221 sisi kiri

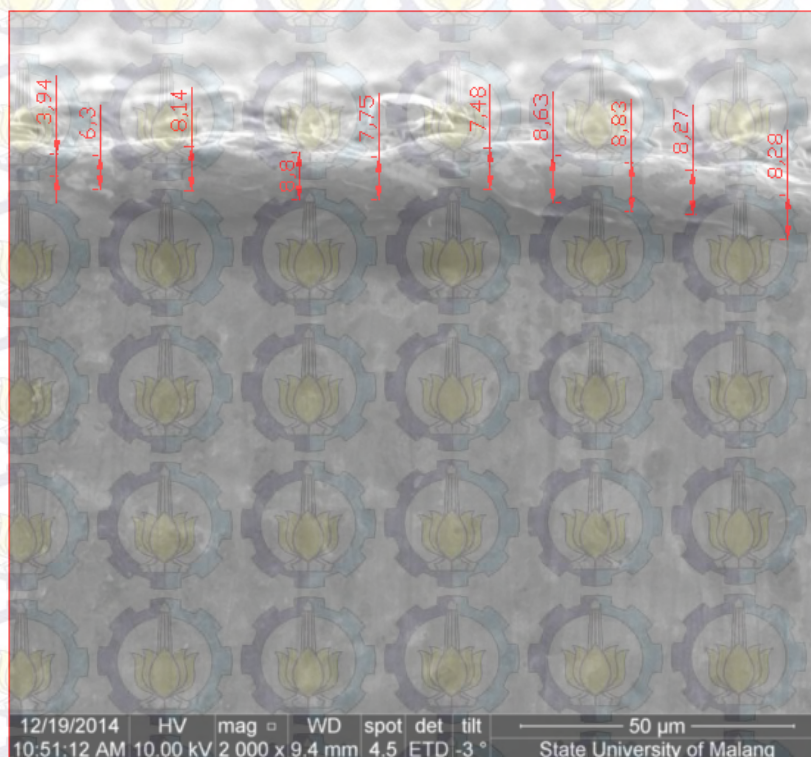


X221 sisi tengah

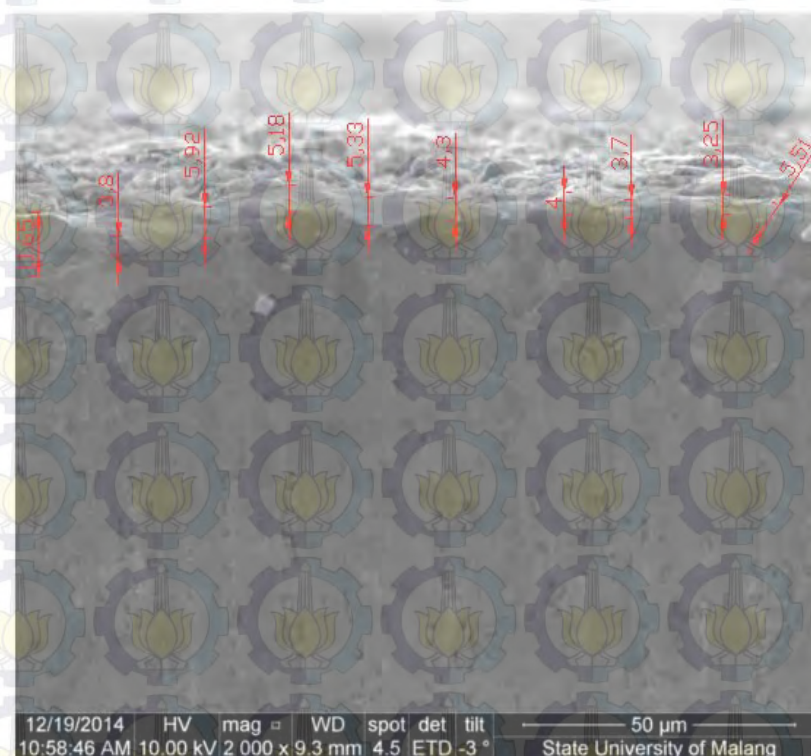




X221 sisi kanan

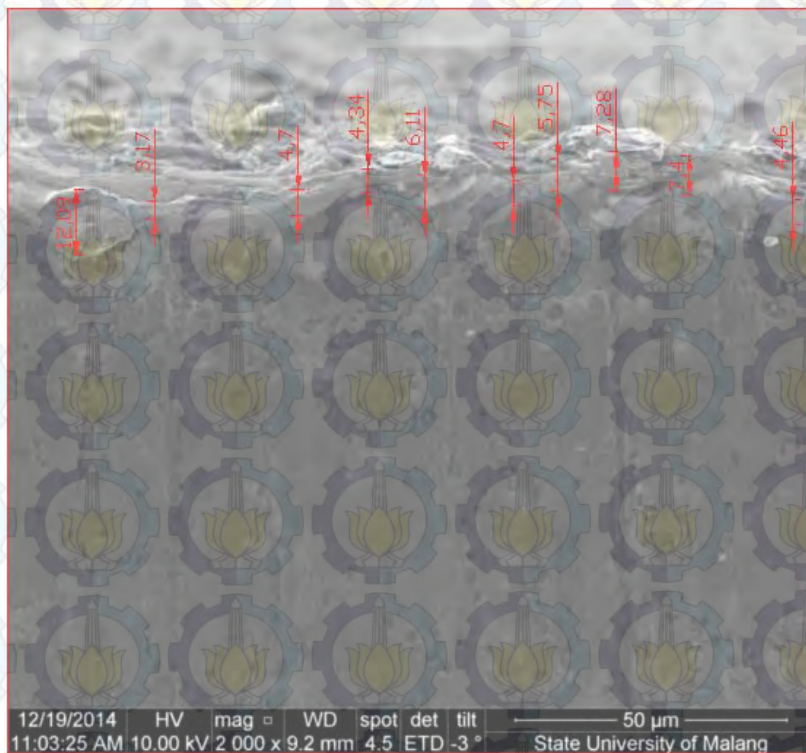


X231 sisi kiri

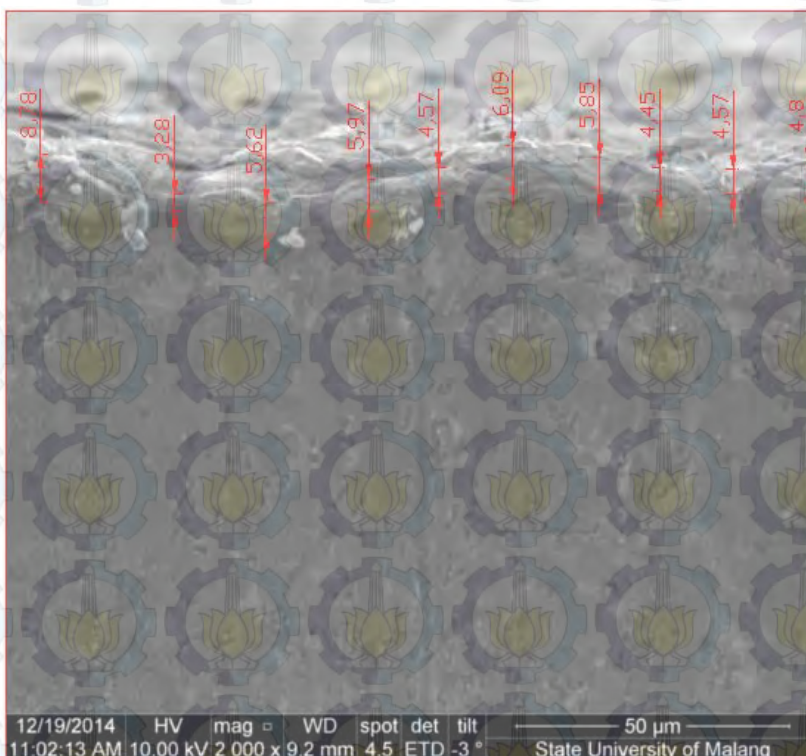




X231 sisi tengah

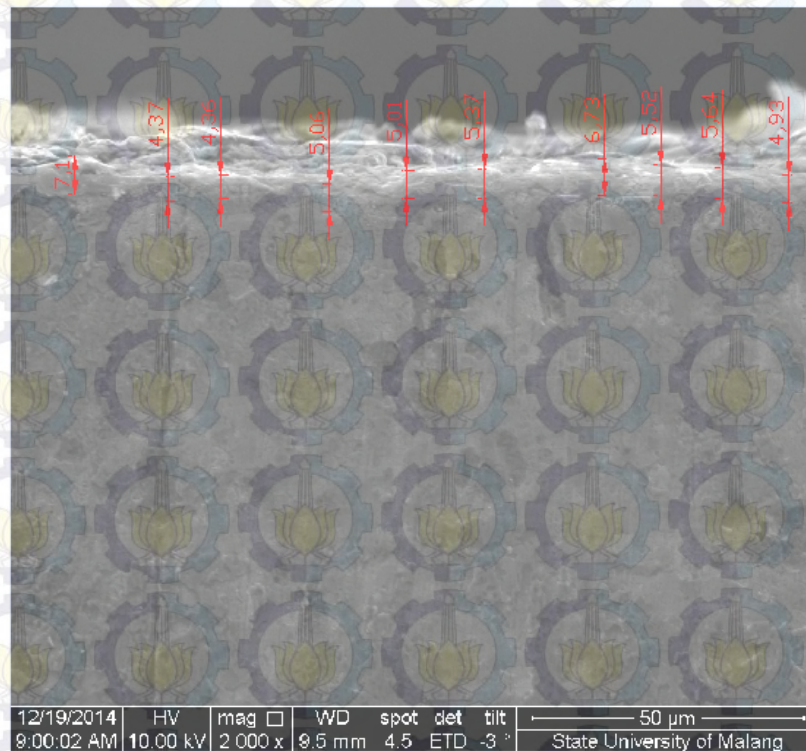


X231 sisi kanan

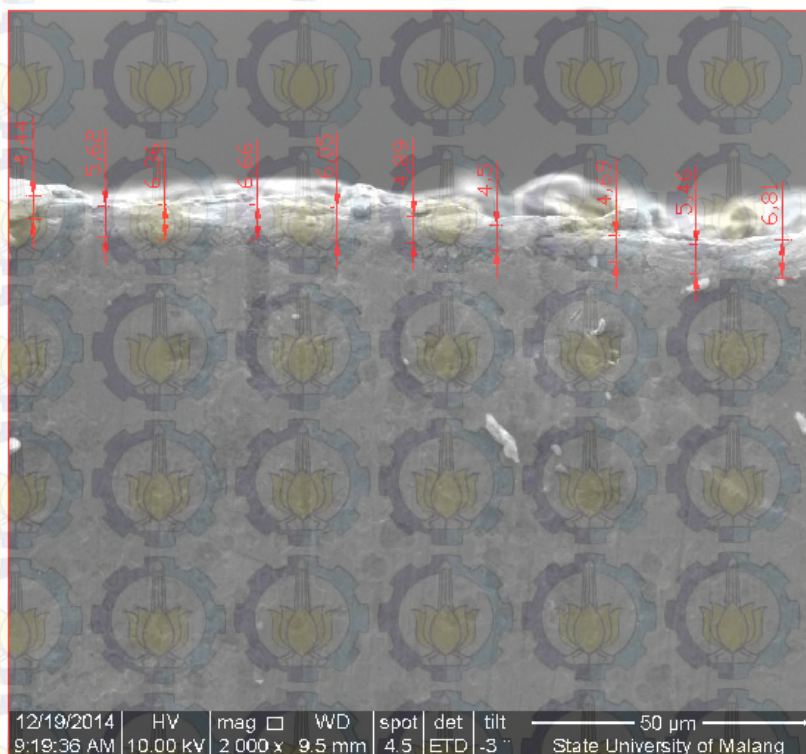




X311 sisi kiri

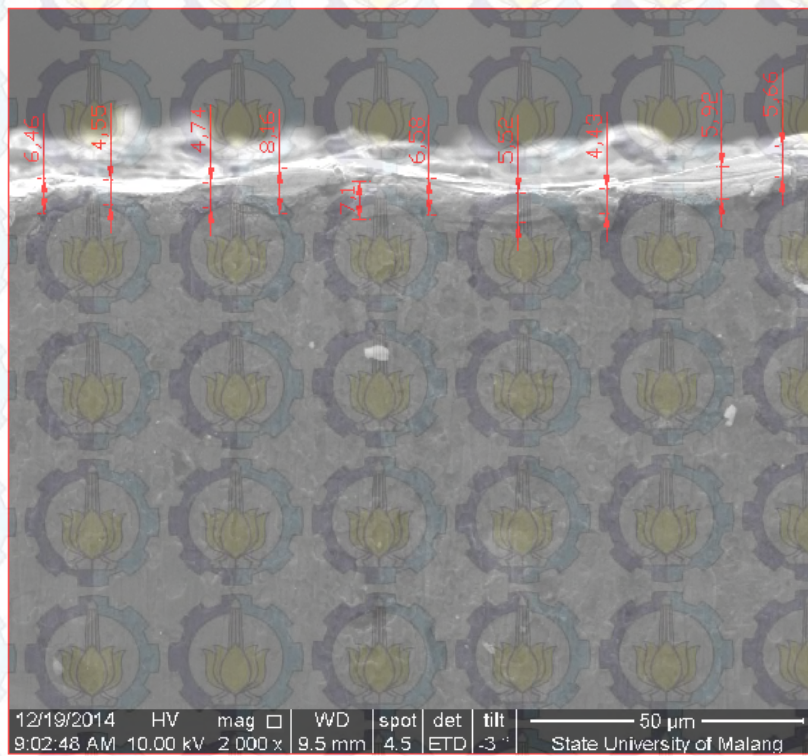


X311 sisi tengah

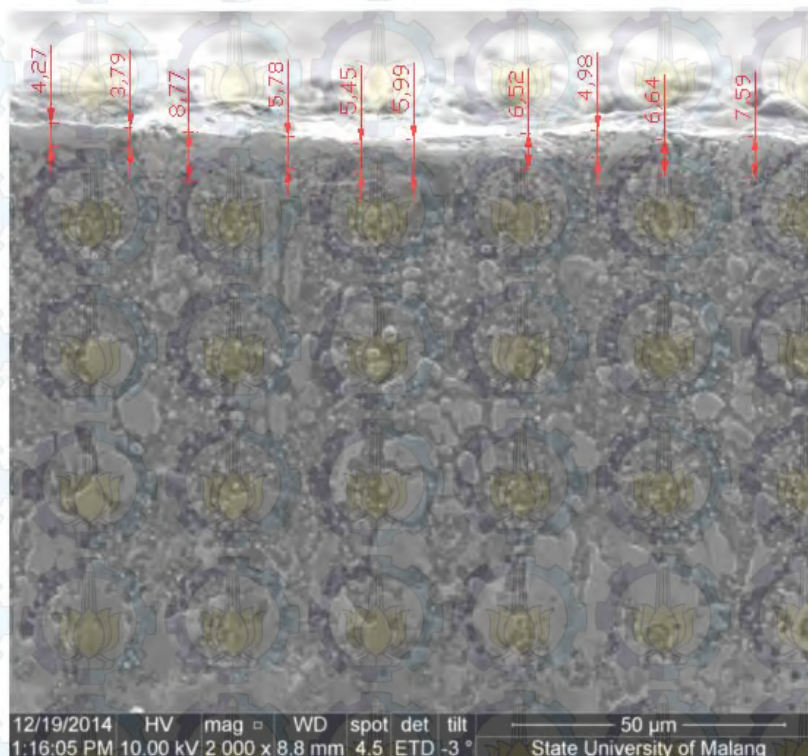




X311 sisi kanan

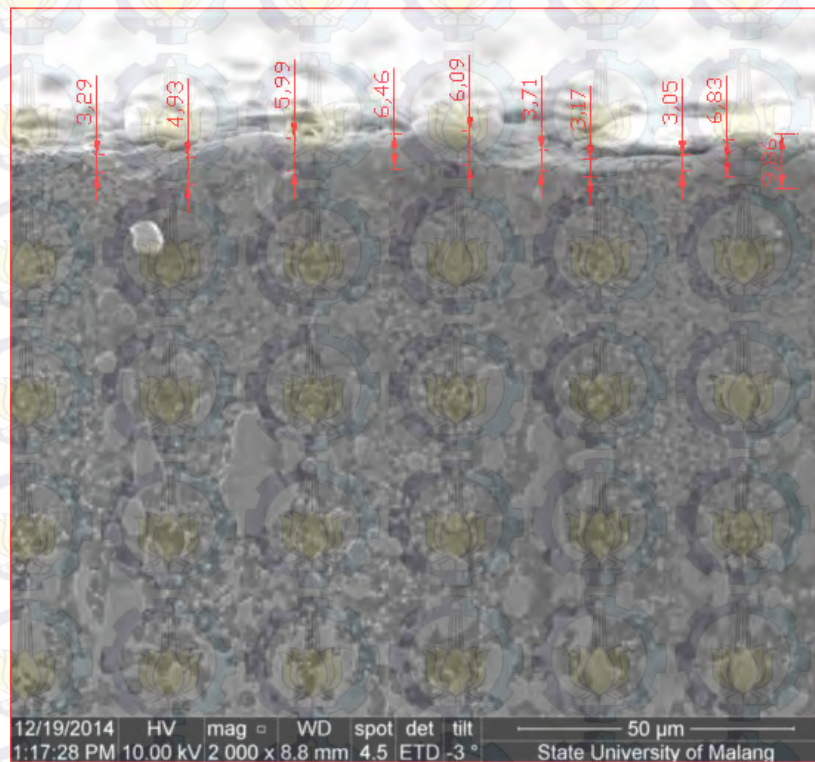


X321 sisi kiri

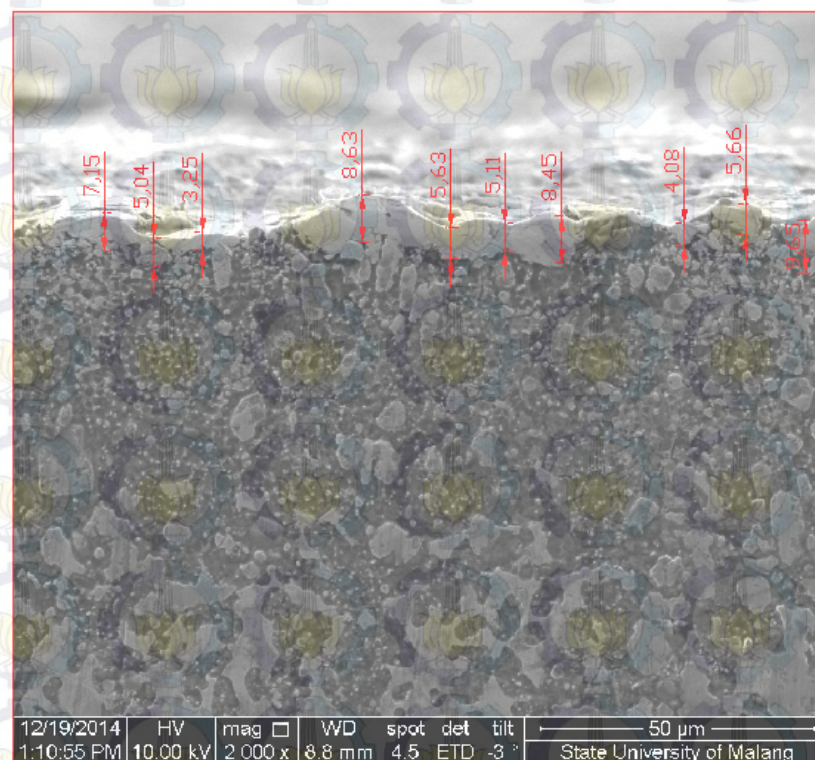




X321 sisi tengah

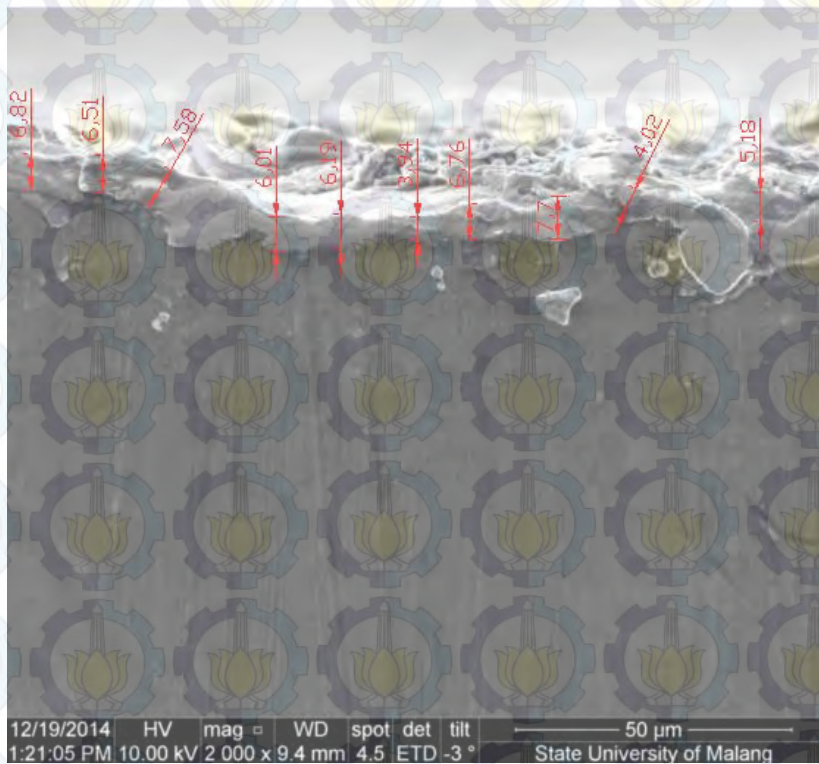


X321 sisi kanan

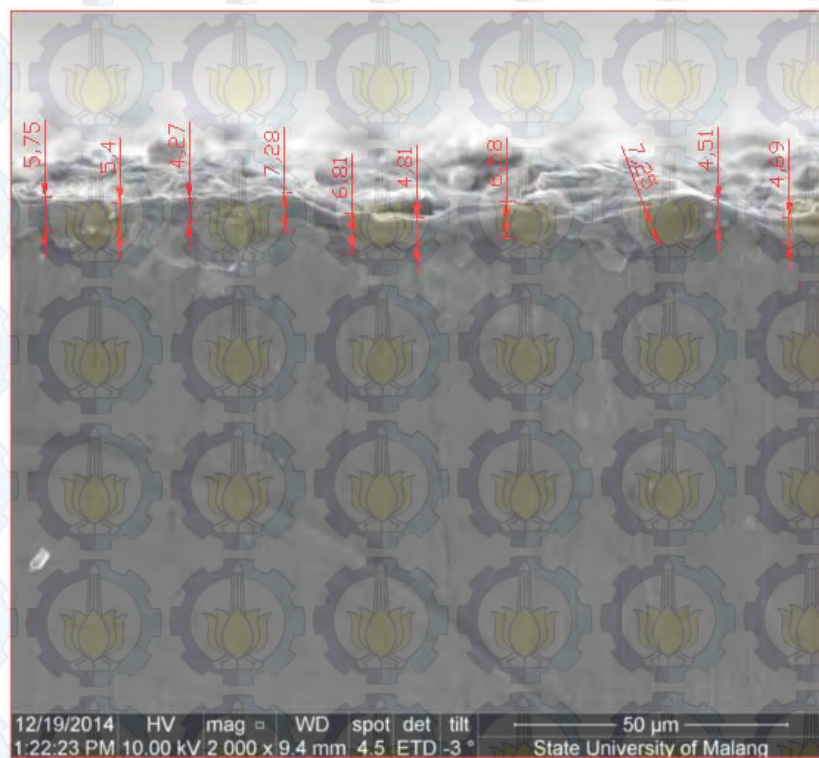




X331 sisi kiri

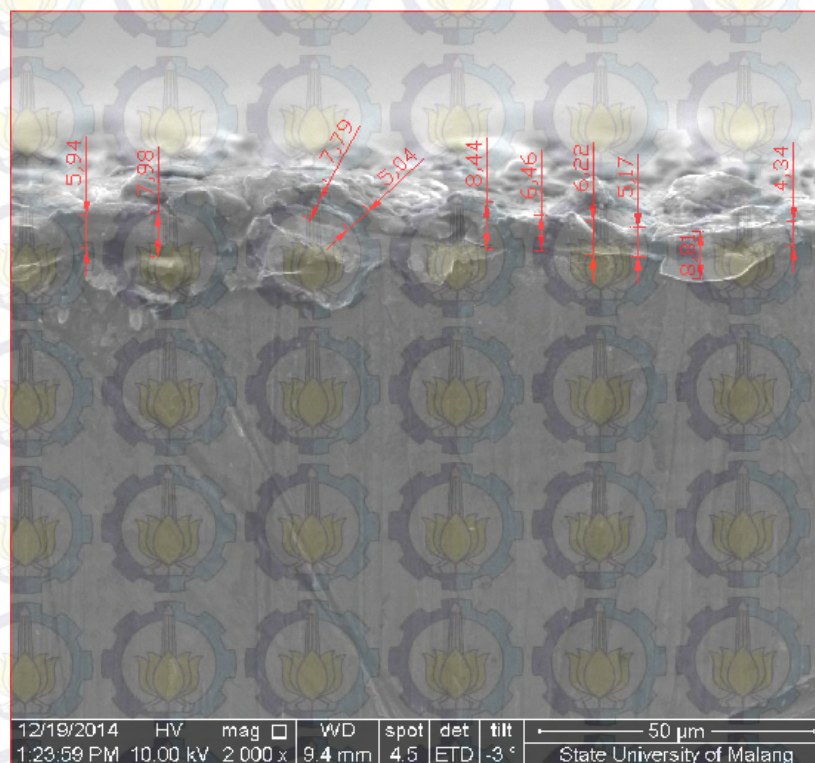


X331 sisi tengah

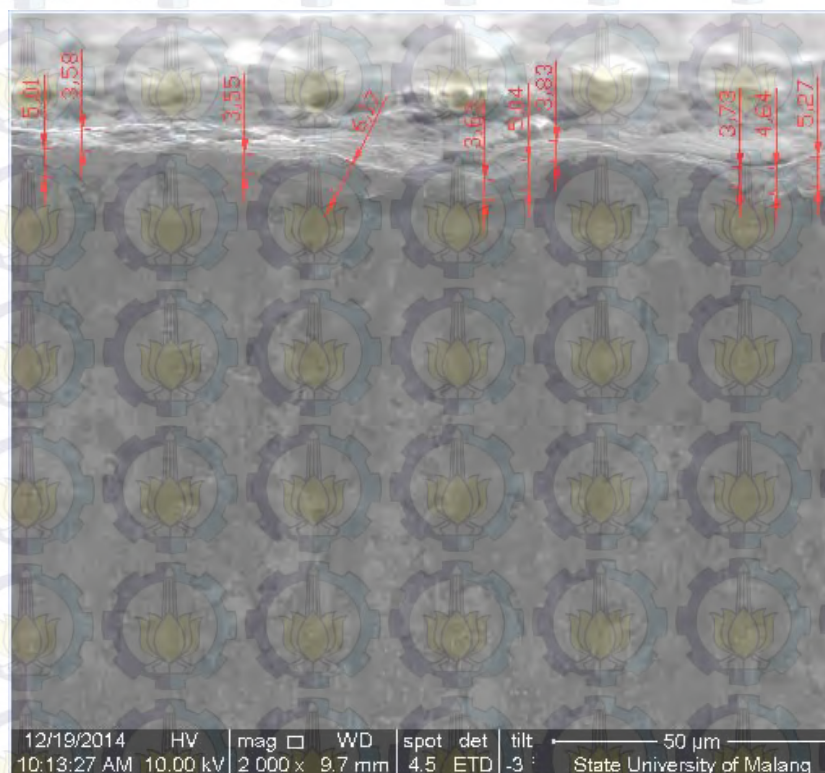




X331 sisi kanan

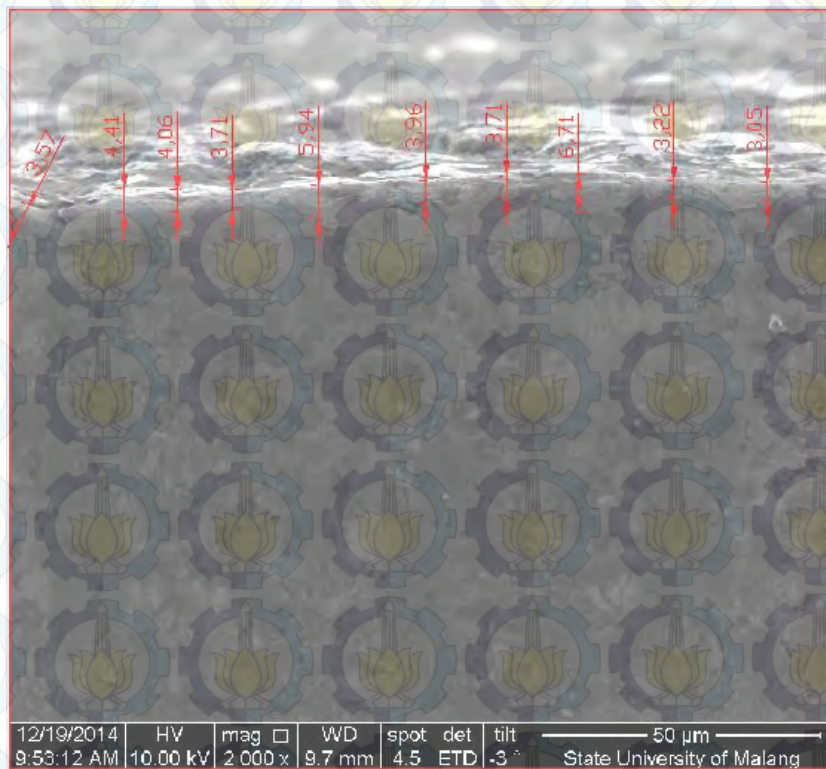


X112 sisi kiri

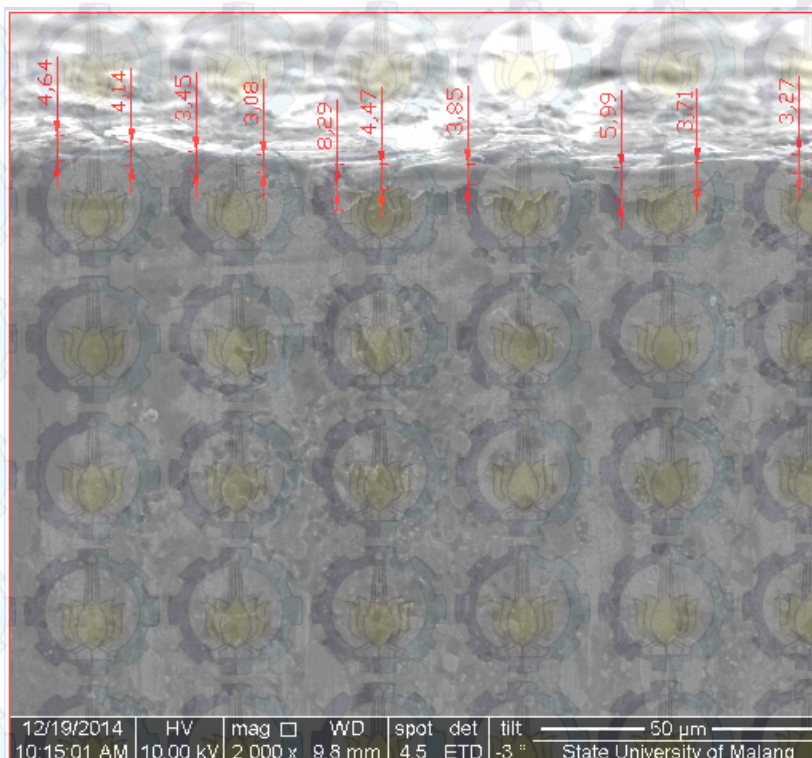




X112 sisi tengah

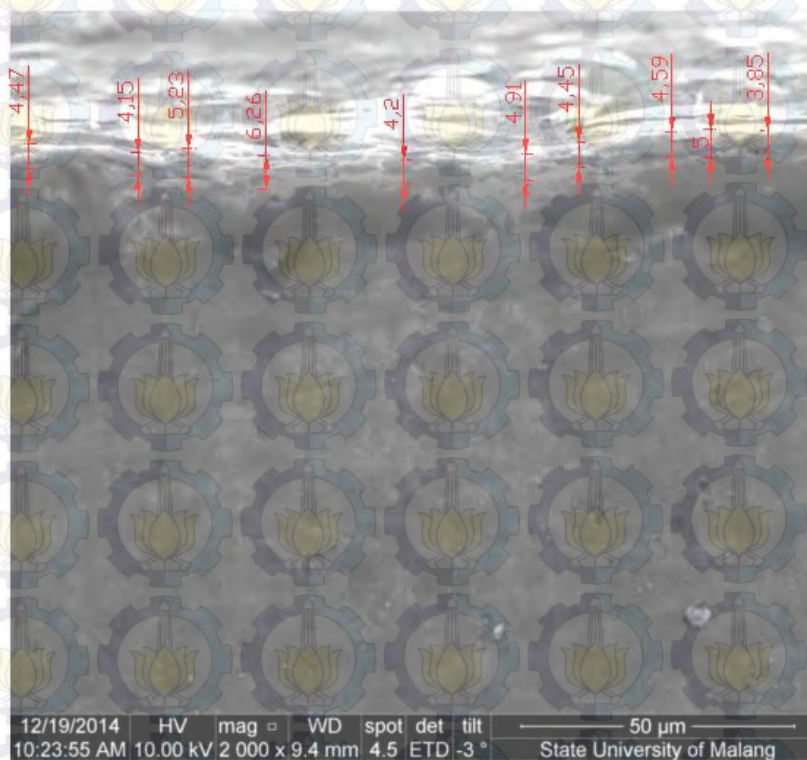


X112 sisi kanan

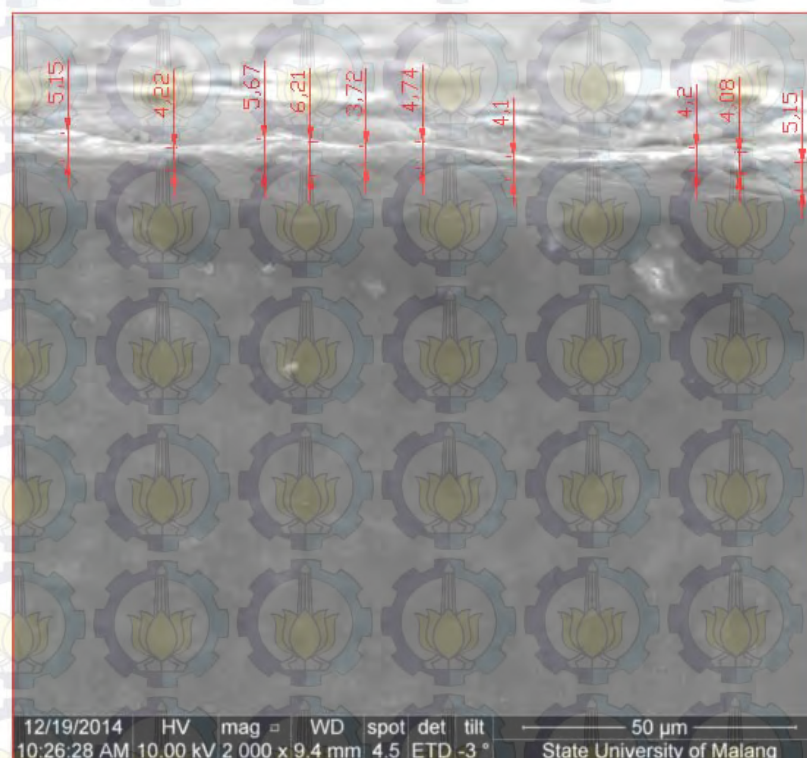




X 122 sisi kiri

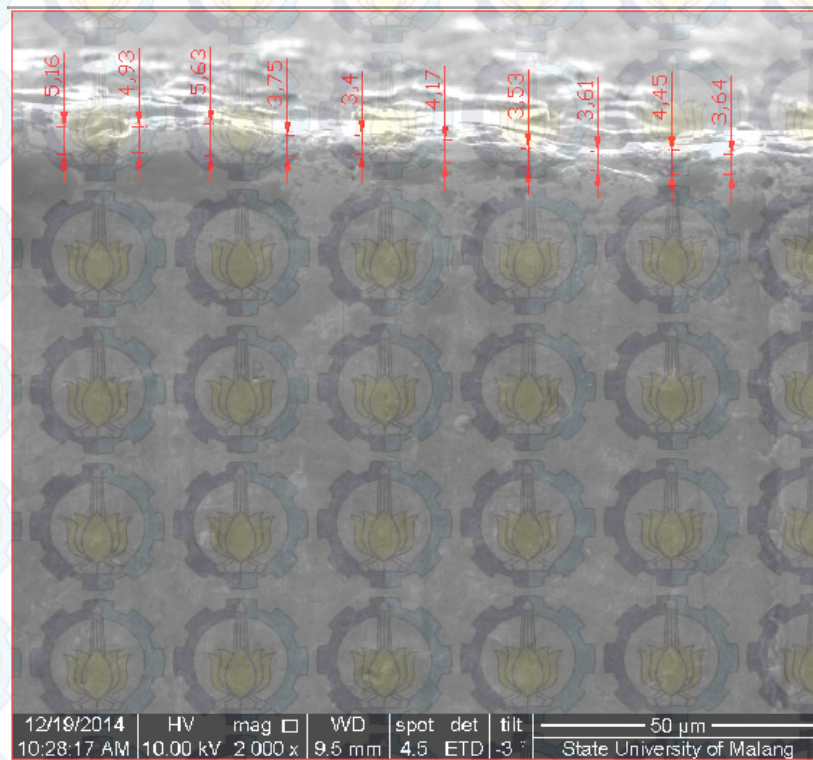


X 122 sisi tengah

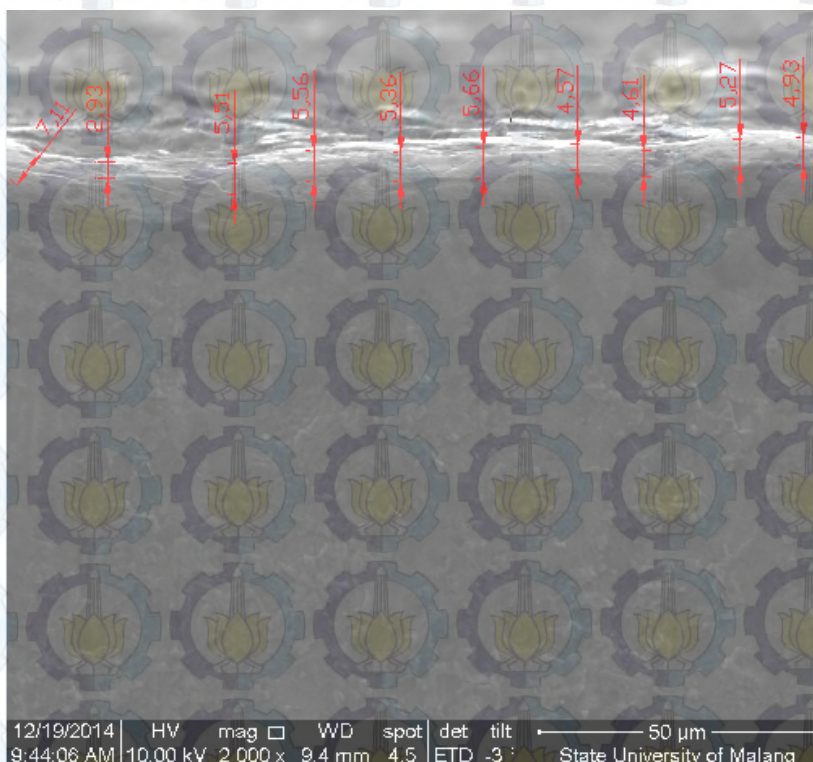




X 122 sisi kanan

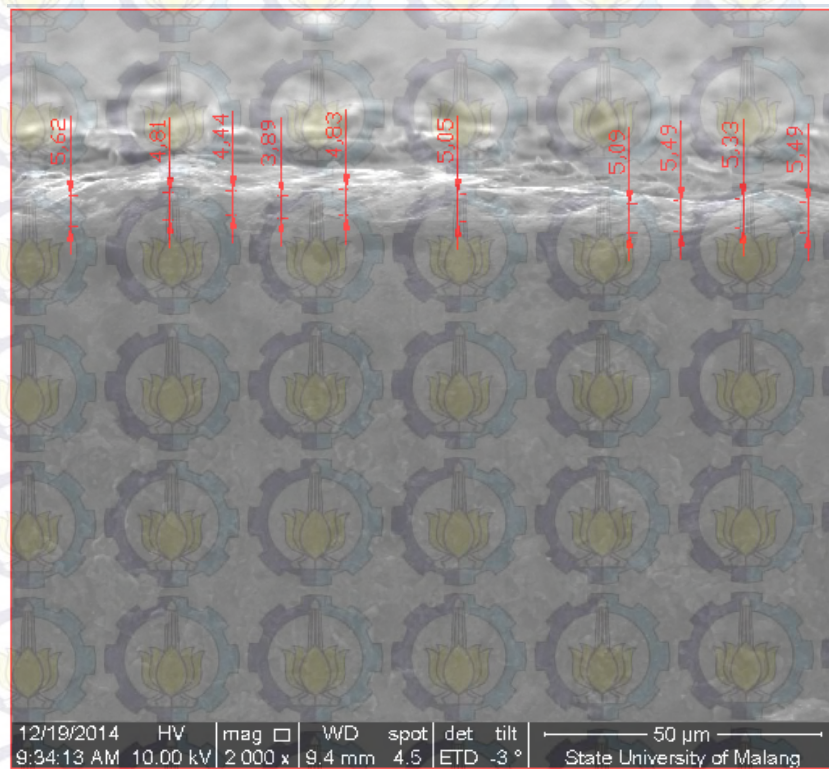


X132 sisi kiri

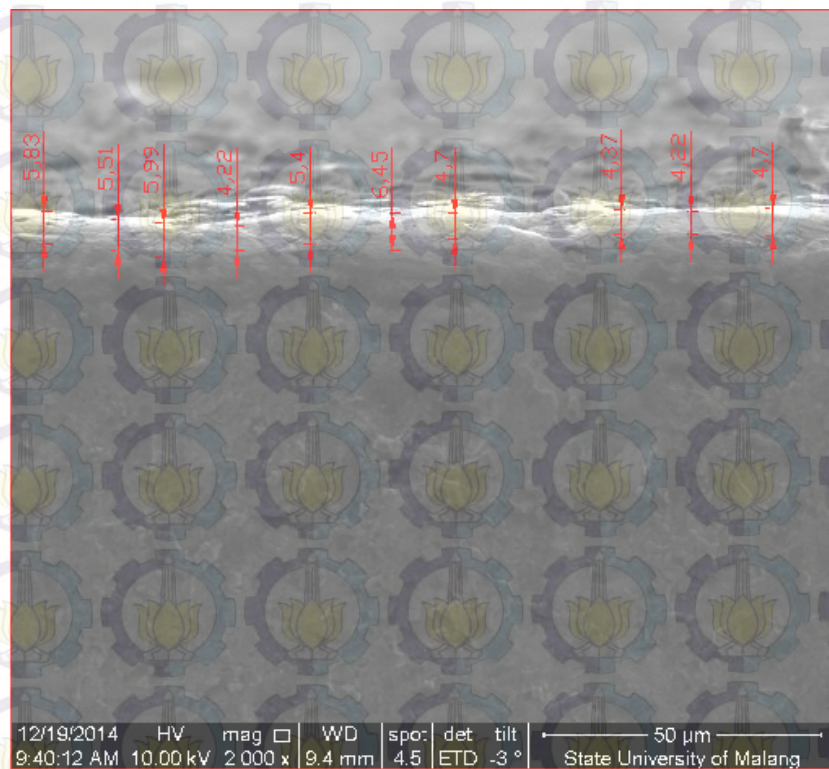




X132 sisi tengah

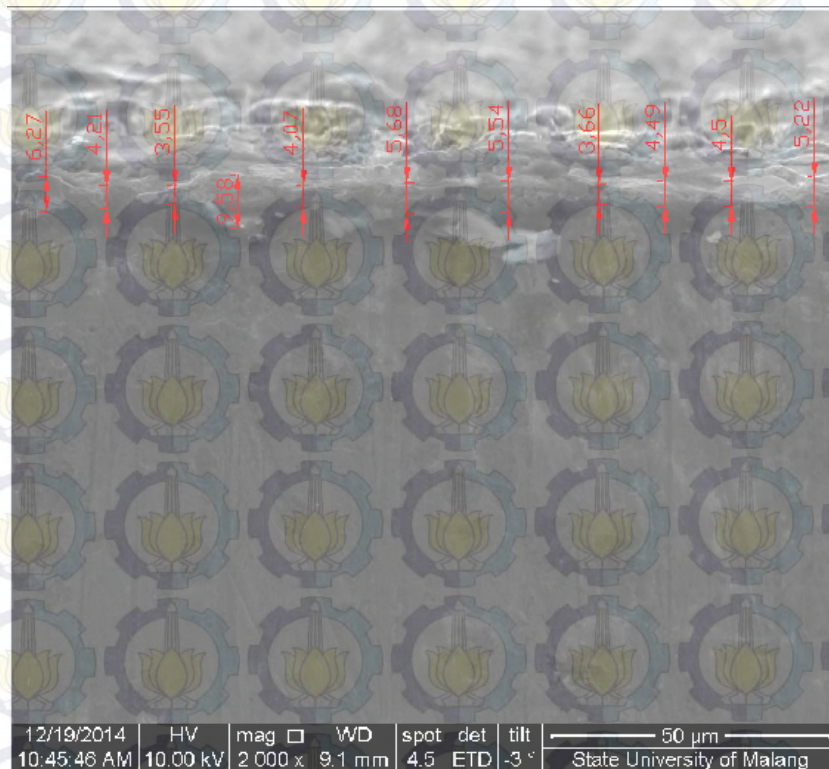


X132 sisi kanan

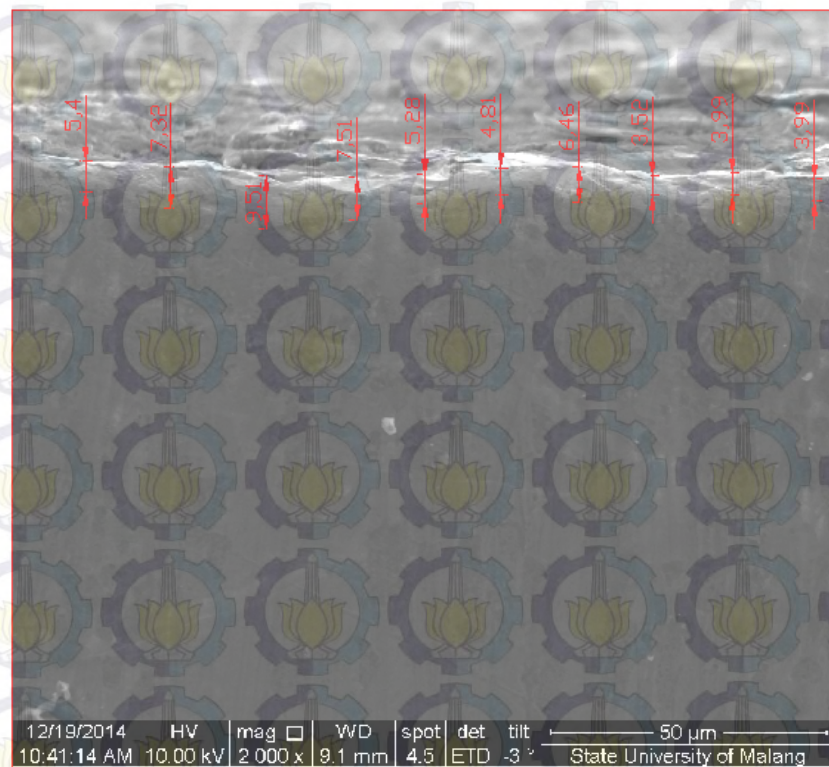




X212 sisi kiri

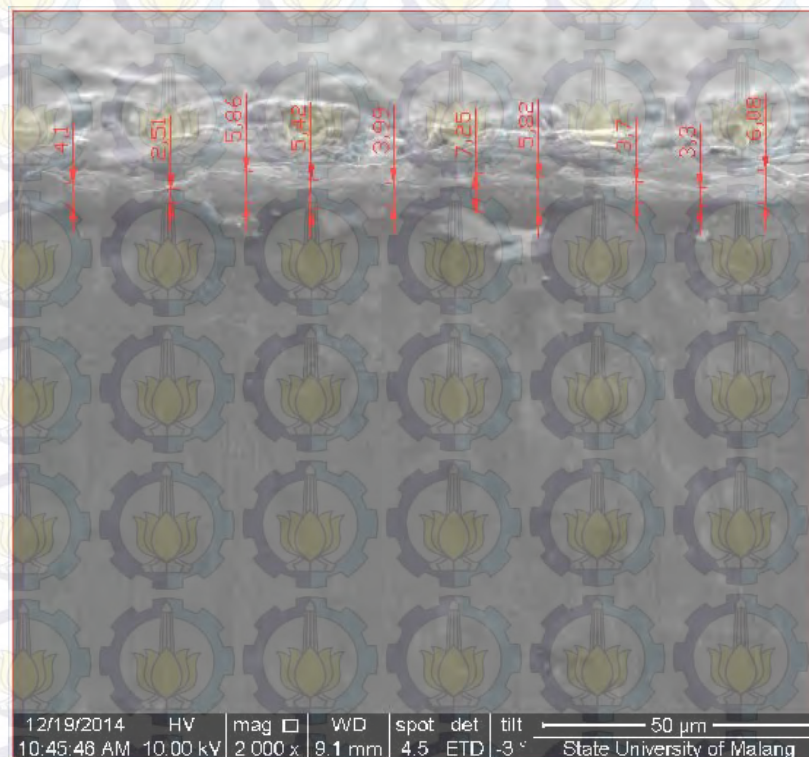


X212 sisi tengah

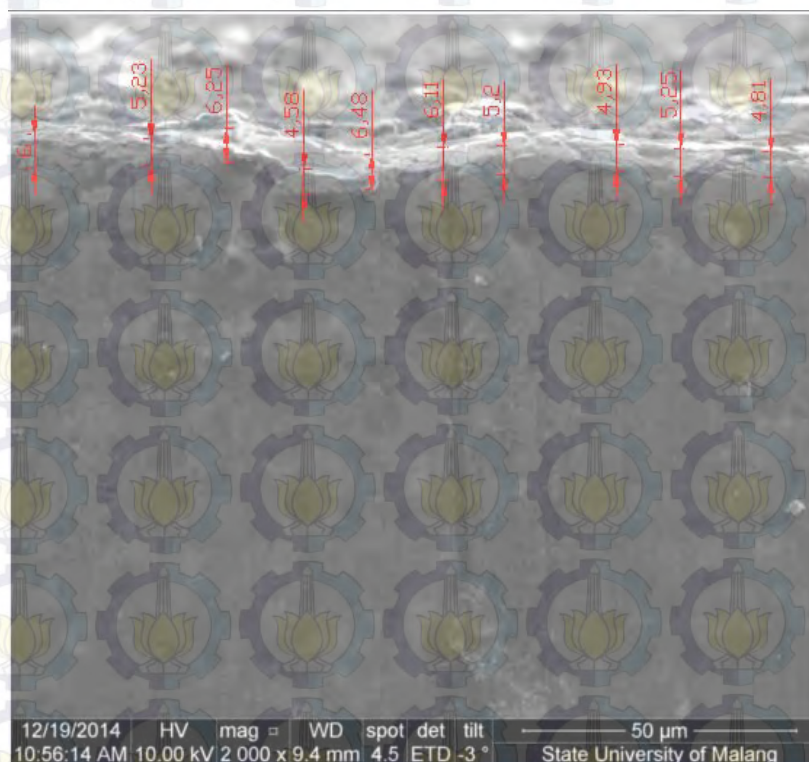




X212 sisi kanan

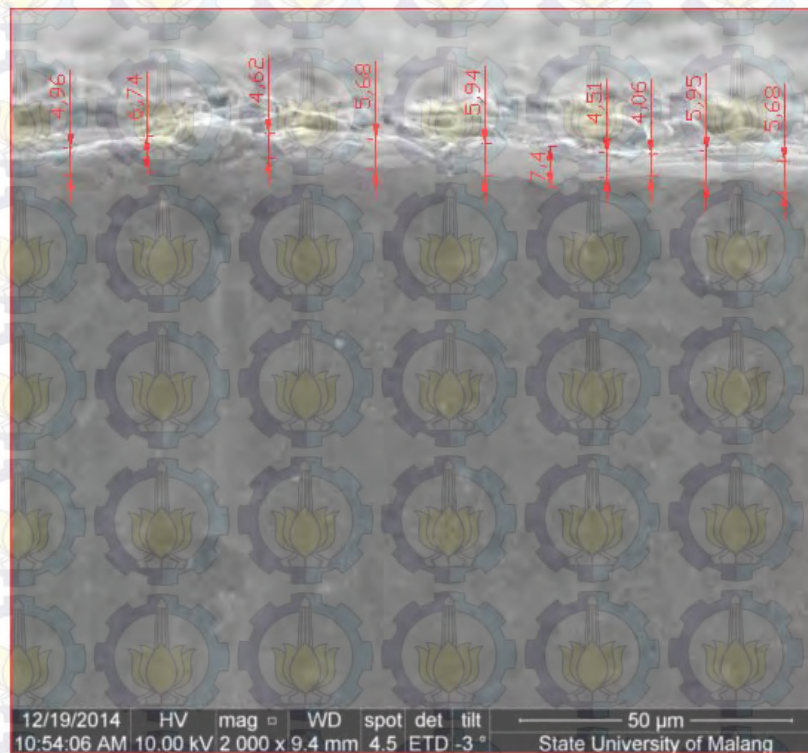


X222 sisi kiri

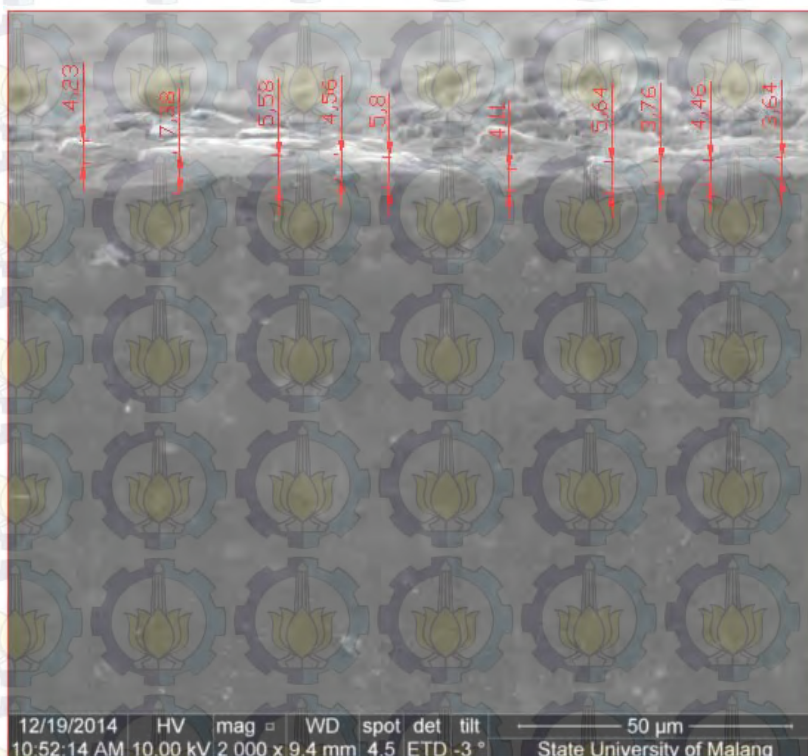




X222 sisi tengah

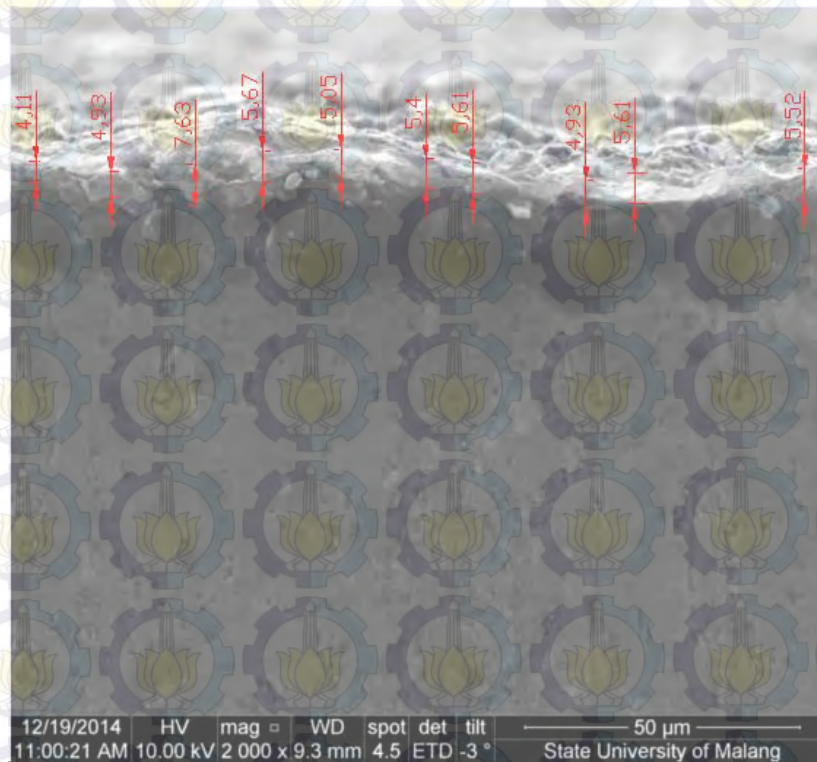


X222 sisi kanan

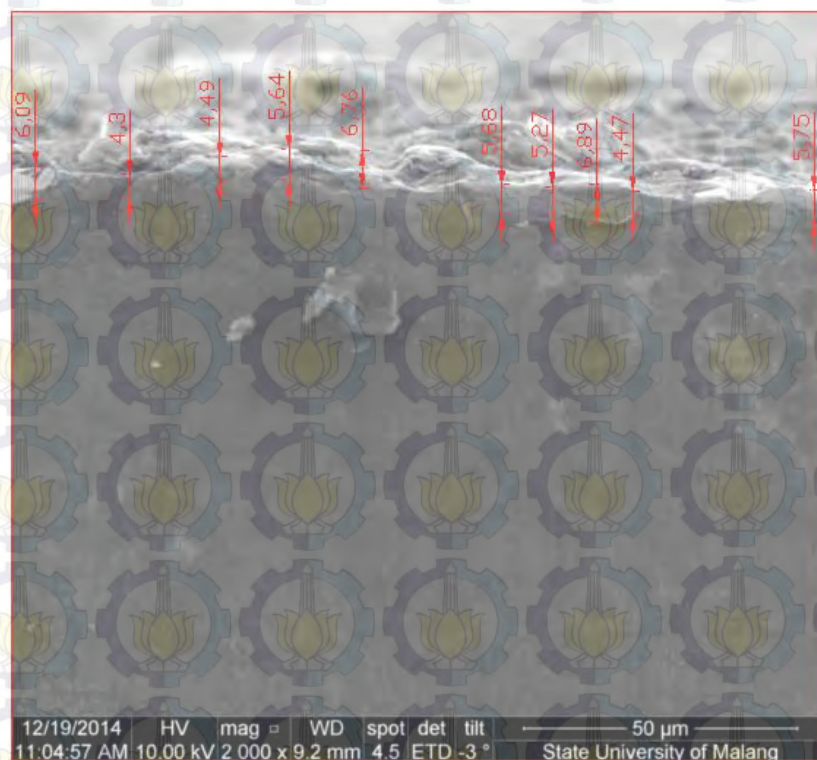




X232 sisi kiri

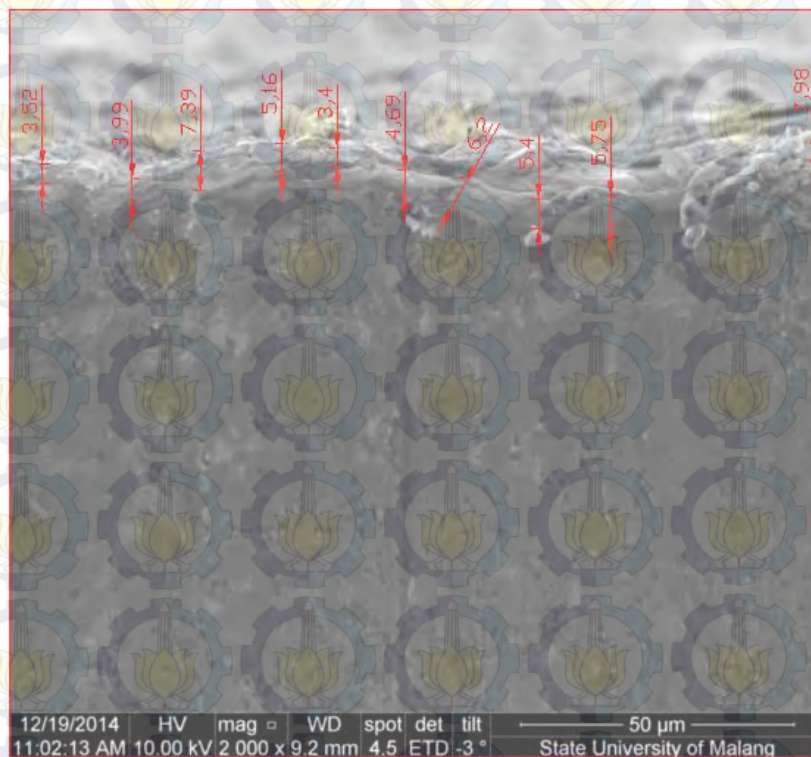


X232 sisi tengah

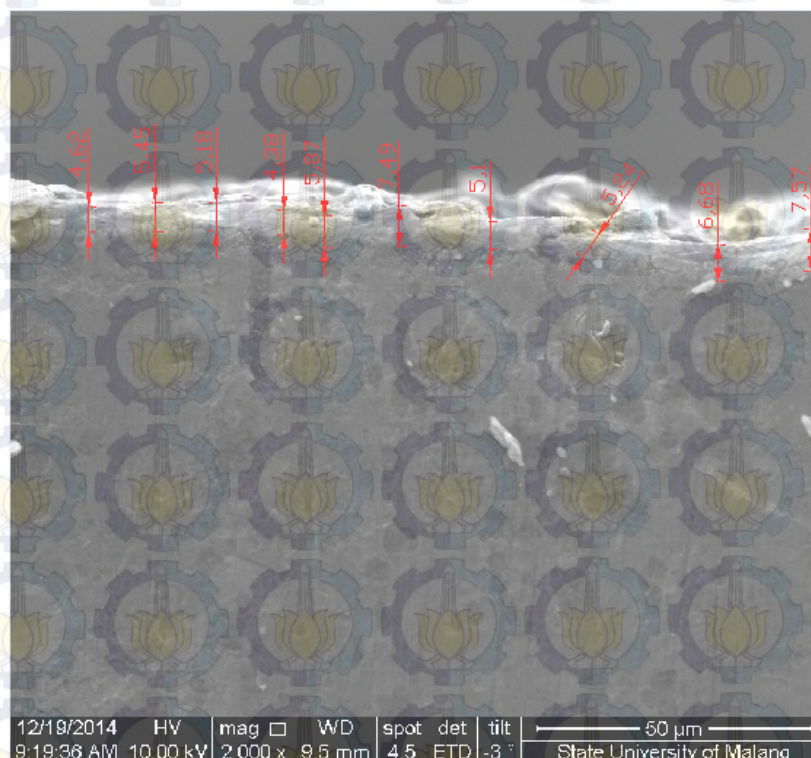




X232 sisi kanan

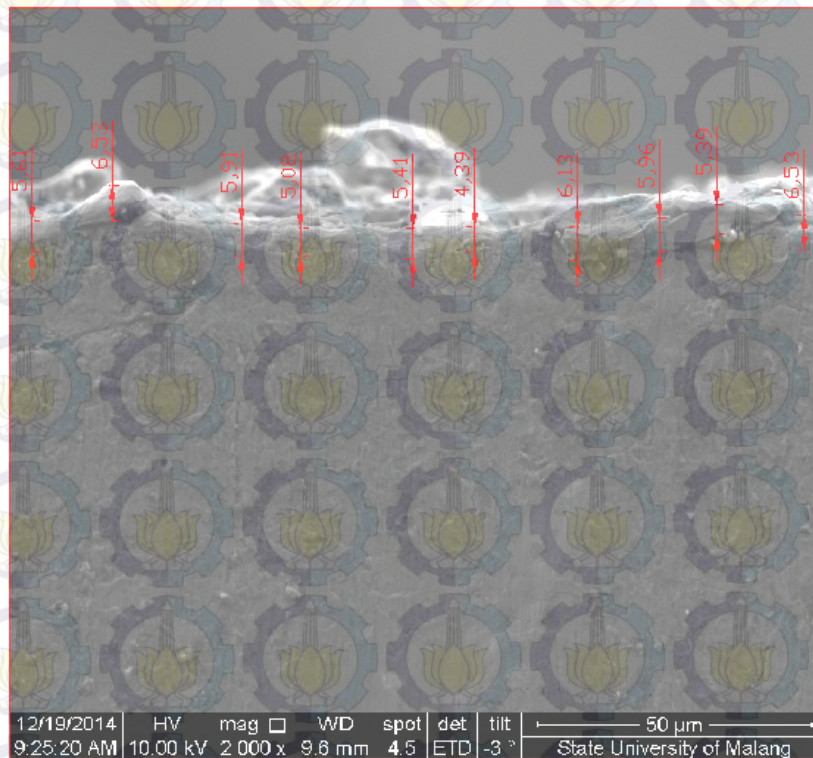


X312 sisi kiri

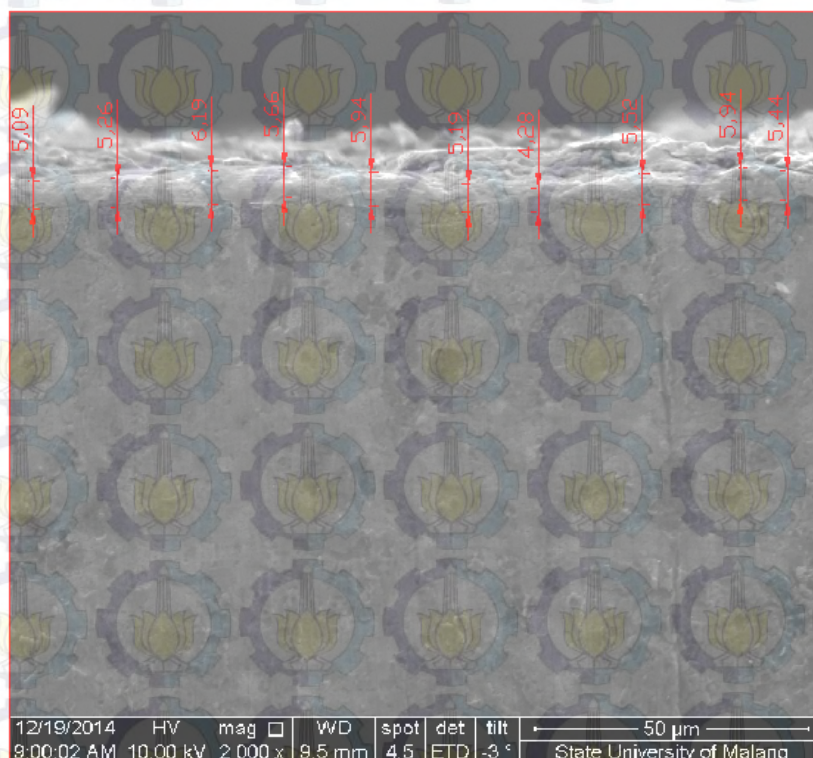




X312 sisi tengah

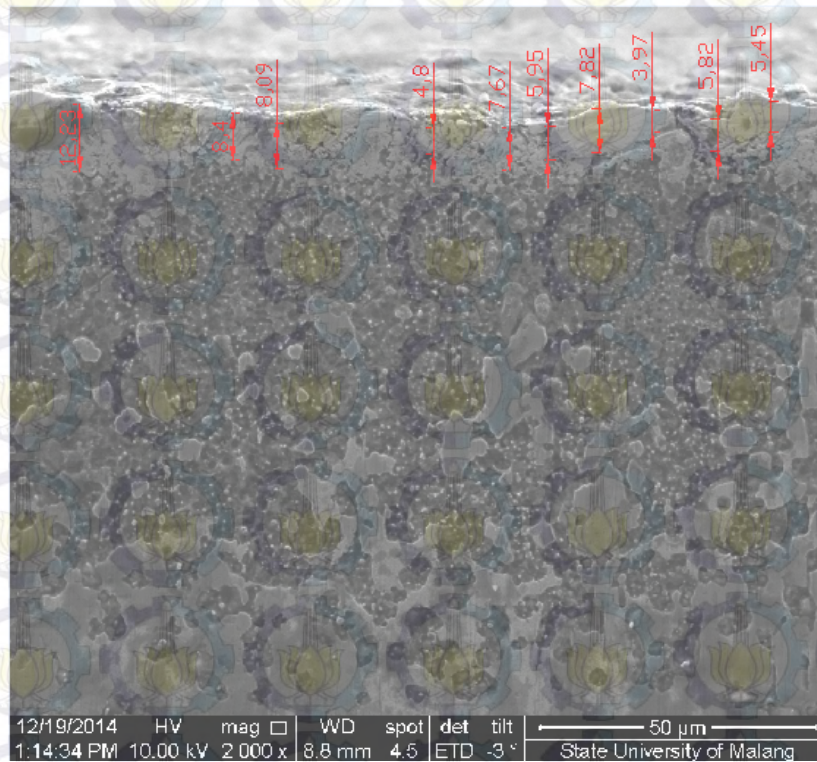


X312 sisi kanan

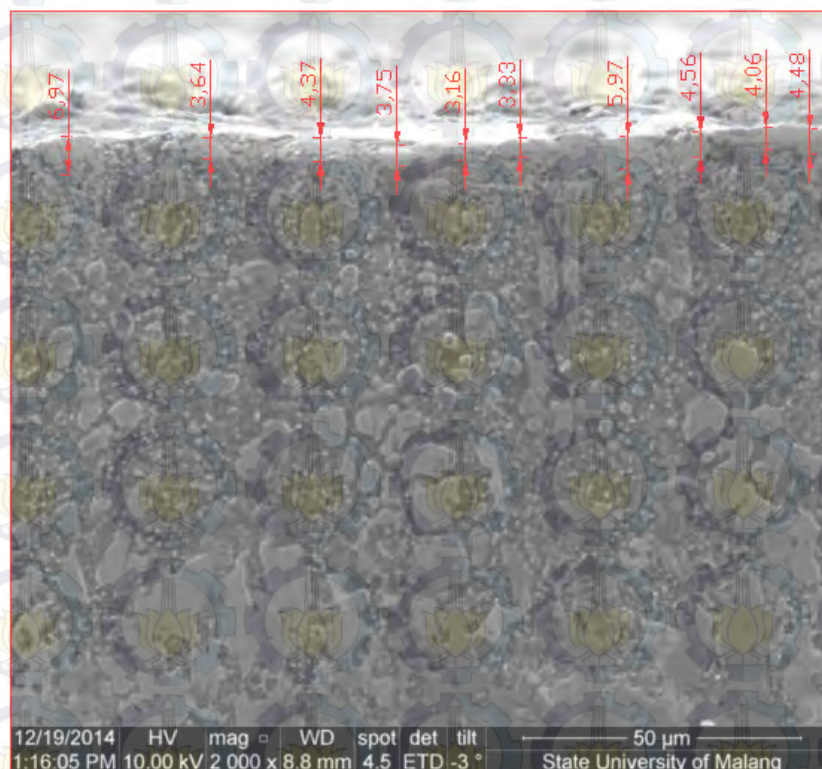




X322 sisi kiri

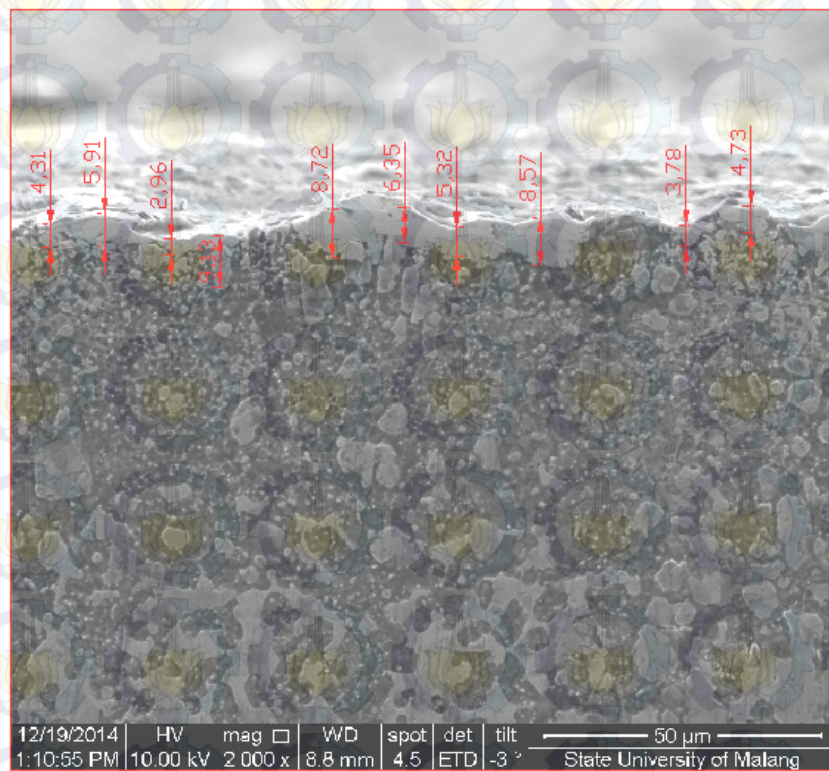


X322 sisi tengah

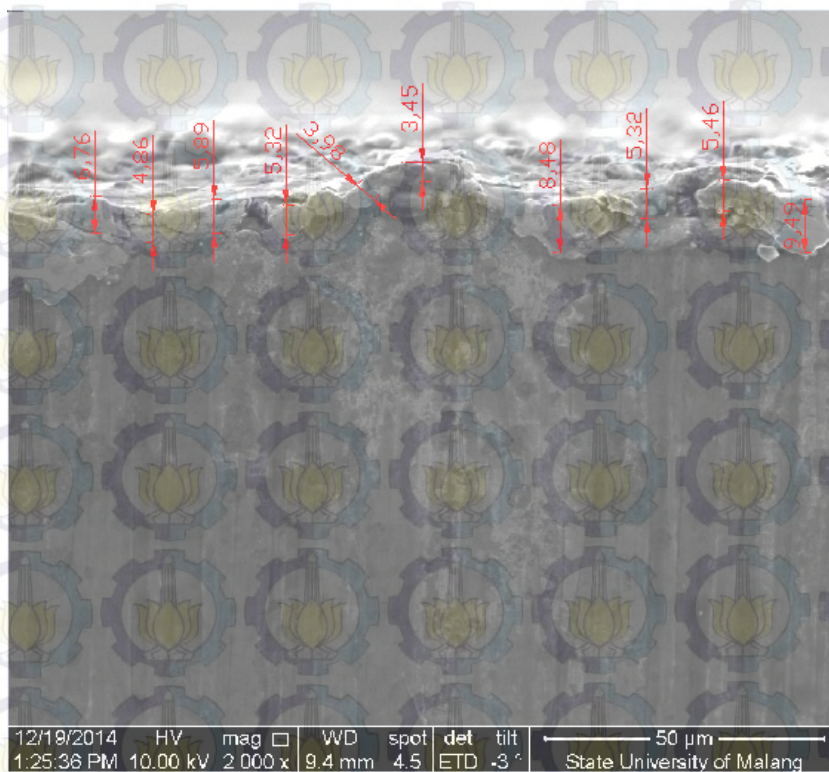




X322 sisi kanan

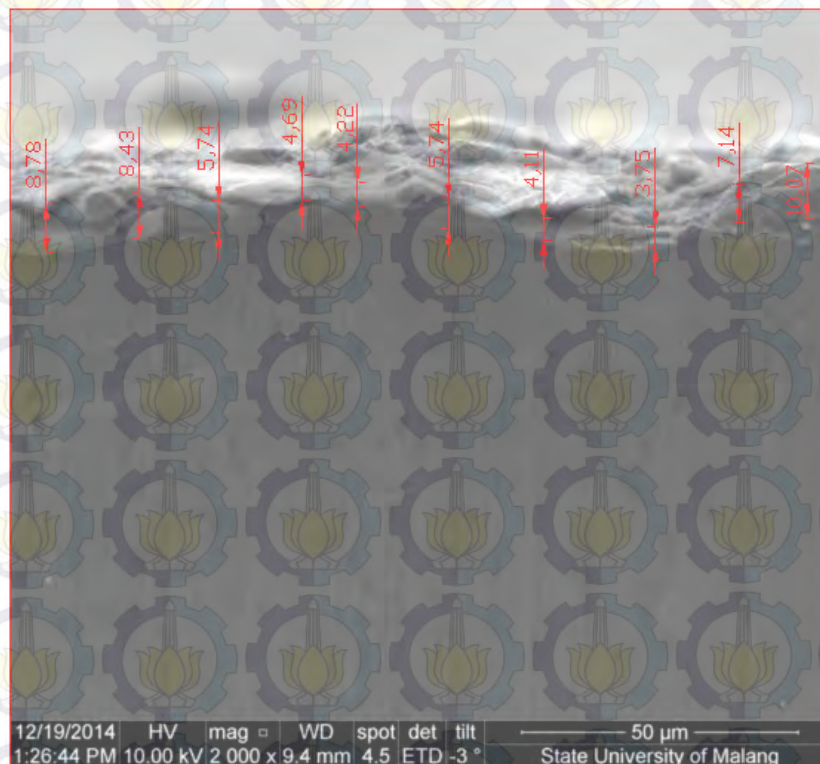


X332 sisi kiri

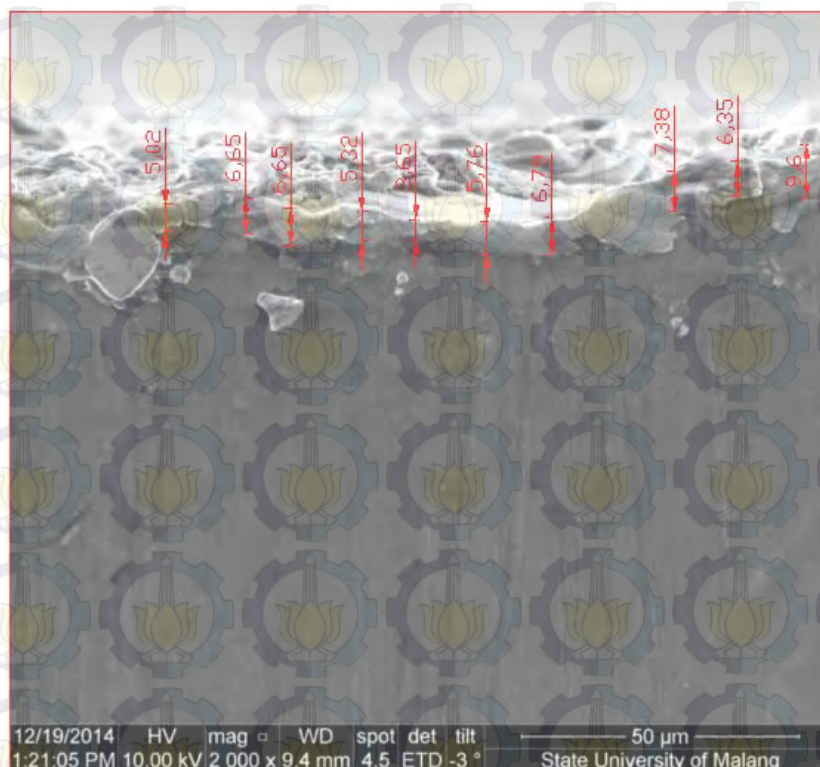




X332 sisi tengah



X332 sisi kanan





## Lampiran 7

### Uji Tukey Dari ON dan OV Terhadap Kekerasan Mikro

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

ON	N	Mean	Grouping
1	6	640,7	A
2	6	593,7	B
3	6	536,8	C

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals

Response Variable kmp

All Pairwise Comparisons among Levels of ON

ON = 1 subtracted from:

	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	-47,0	3,635	-12,93	0,0000
3	-103,9	3,635	-28,59	0,0000

ON = 2 subtracted from:

	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	-56,93	3,635	-15,66	0,0000

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

OV	N	Mean	Grouping
1	6	610,0	A
2	6	599,1	B
3	6	562,0	C

Tukey Simultaneous Tests

Response Variable kmp

All Pairwise Comparisons among Levels of OV

OV = 1 subtracted from:

	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	-10,96	3,635	-3,02	0,0251
3	-48,03	3,635	-13,21	0,0000

OV = 2 subtracted from:

	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	-37,07	3,635	-10,20	0,0000



## DAFTAR PUSTAKA

Aspinwall, D. K. Soo, S. L., Berrisford, A. E., dan Walder, G. (2008), "Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 Using Minimum Damage Generator Technology," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, pp. 187-190.

Davim, J. P. (2009), *Surface Integrity in Machining*, Springer-Verlag London Limited, London

Dieter, G. E. (1993), *Mechanical Metallurgy 3rd Edition*, McGraw-Hill Inc, London.

Ghodsieh, D. Golshan, A., Shirvanehdeh, J. A. (2013), "Review on Current Research Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)," *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 6.

Guirau, E. B. (1997), *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.

Hassan, M. A., Mehat, N. S., Sharif, S., Daud, R., Tomadi, S. H., dan Reza, M. S. (2009), "Study of the Surface Integrity of AISI 4140 Steel in Wire Electrical Discharge Machining," *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists (IMECS)*, Vol. II.

Ho, H. K. dan Newman, S. T. (2003), "State of The Art Electrical Discharge Machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1287-1300.

Ho, H. K., Newman, S. T., Rahimifard, S., dan Allen, R. D. (2004), "State of The Art in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1247-1259.

Iriawan, N., dan Astuti, S. P., (2006), *Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan Minitab 14, Edisi I*, Andi Offset, Yogyakarta.

Lee, H. T. dan Tai, T. Y. (2003), "Relationship between EDM Parameters and Surface Crack Formation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 676-683.

Newton, T. R., Melkote, S. N., Watkins, T. R., Trejo, R. M., dan Reister, L., (2009), "Investigation of The Effect Process Parameter on Formation and Characteristic of Recast Layer in Wire-EDM of Inconel 718," *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 513, pp. 208-215.



Pandey, P. C. dan Shan, H. S., (1980), *Modern Machining Processes*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.

Park, S. H. (1996), *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, 1<sup>st</sup> edition, Chapman & Hall, London.

Rochim, T. (1993), *Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Rochim, T. (2001), *Spesifikasi, Metrologi & Kontrol Kualitas Geometrik*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Ross, P. J. (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill Companies, Inc., Taiwan.

Rupajati, P. (2013), *Optimasi Tebal Lapisan Recast Dan Kekasaran Permukaan Pada Proses Pemesinan Wire Electrical Discharge Machining (Wire-Edm) Baja Perkakas Aisi H13 dengan Menggunakan Metode Taguchi dan Logika Fuzzy, Serta Analisis Microcracks Pada Benda Kerja*, Tesis yang Tidak Dipublikasikan, Program Magister Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.

Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Sommer, C. dan Sommer, S. (2005), *Complete EDM Handbook*, Advanced Publishing Inc., Houston.

\_\_\_\_\_. (2006), *Instruction Manual Book Wirecut CHMER CW32GF*, Ching Hung Machinery and Electric Industrial Co., Ltd.

[http://www.allaboutgemstones.com/vickers\\_hardness.html](http://www.allaboutgemstones.com/vickers_hardness.html), diakses 26 Januari 2015

<http://author.uthm.edu.my/uthm/www/content/lessons/2686/Chapter-2003-20-28EDM-29-20-2009-20Mac-202012.pdf>, diakses 10 September 2014

<http://edmttechman.com>, diakses 10 September 2014

<http://www.uddeholm.se/english/files/edm-english.pdf>, diakses 14 September 2014